

# Deckblatt



BUNDESGESELLSCHAFT  
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Blatt: 1
NAAN	NNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	23420000				MAK	RB	0001	00	Stand: 24.02.2022

Titel der Unterlage:

UNTERSUCHUNG DER MACHBARKEIT DER CHARAKTERISIERUNG VON RADIOAKTIVEN  
ABFÄLLEN AUS DER SCHACHTANLAGE ASSE II MITTELS MYOGRAPHIE

Ersteller/Unterschrift:

LYNKEOS TECHNOLOGY LIMITED



Stempelfeld:

UVST:

bergrechtlich  
verantwortliche Person:



Diese Unterlage unterliegt samt Inhalt dem Schutz des Urheberrechts sowie der Pflicht zur vertraulichen Behandlung auch bei Beförderung und Vernichtung und darf vom Empfänger nur auftragsbezogen genutzt, vervielfältigt und Dritten zugänglich gemacht werden. Eine andere Verwendung und Weitergabe bedarf der ausdrücklichen Zustimmung der BGE.



**Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von  
Radioaktiven Abfällen aus der Schachtanlage Asse II mittels  
Myographie**



BUNDESGESELLSCHAFT  
FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd.-Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNNN	NNA AANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	23420000				MAK	RB	0001	00

Blatt: 3

**Freiblatt**

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Auf	
NAAN	NNNNNNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	23420000				MAK	RB	0001	00	
Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachanlage Asse II mittels Myographie									BGE BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG Blatt:4



**Auftraggeber (AG):**

BGE mbH (Schachanlage Asse II)  
Am Walde 2  
38319 Remlingen

**Auftragnehmer (AN):**

Lynkeos Technology Ltd.  
No. 11 The Square  
University of Glasgow  
G12 8QQ  
UNITED KINGDOM


**Bestell-Nr. (AG):**

45194577 vom 04.12.2020

Glasgow, den 24.02.2022



Manager für Geschäftsentwicklung

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Auf	
NAAN	NNNNNNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	23420000				MAK	RB	0001	00	
Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachtanlage Asse II mittels Myographie									 <b>BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG</b>
									Blatt:5

# Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachtanlage Asse II mittels Myographie

Lynkeos Technology Limited

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Auf	
NAAN	NNNNNNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	23420000				MAK	RB	0001	00	
Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachtanlage Asse II mittels Myographie									BGE BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG
									Blatt:6

## KURZFASSUNG

Autor(en): David Mahon, Simon Gardner, Dan Wright, Guangliang Yang

Übersetzer: XXXXXXXXXX

Bezeichnung: Untersuchung der Machbarkeit zur Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachtanlage Asse II mittels Myographie

vom 31.01.2022

Behälter für radioaktive Abfälle müssen künftig aus der Schachtanlage Asse II in Deutschland geborgen werden. Bevor diese Behälter weiter behandelt und gelagert werden können, müssen sie detailliert charakterisiert werden. Myonentomographie mit kosmischer Strahlung oder Myographie ist eine aufstrebende Technologie, die sich als wirksames Mittel erwiesen hat, den Inhalt abgeschirmter Behälter mit radioaktiven Abfällen in der britischen Nuklearindustrie abzubilden. Diese passive Zustandsüberwachungs- und Inspektionstechnik hat ein erhebliches Potenzial, den Sicherheitsnachweis für die langfristige Lagerung von Abfallverpackungen zu erbringen. **Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE)** und **Lynkeos Technology Limited (Lynkeos)** haben eine Machbarkeitsstudie über den Einsatz von Myographie für Abfallbehälter, insbesondere betongeschirmte 200-Liter-Fässer, durchgeführt. Die Analyse detaillierter Computersimulationen und die Diskussion der Ergebnisse bilden die Grundlage der Studien, auf die dieser Bericht beruht.


Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Auf	
NAAN	NNNNNNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	23420000				MAK	RB	0001	00	

Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachtanlage Asse II mittels Myographie

Blatt:7

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>KURZFASSUNG</b> .....		<b>6</b>
<b>INHALTSVERZEICHNIS</b> .....		<b>7</b>
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b> .....		<b>9</b>
<b>ABKÜRZUNGSLISTE</b> .....		<b>12</b>
<b>1 EINLEITUNG</b> .....		<b>13</b>
<b>2 HINTERGRUNDINFORMATIONEN</b> .....		<b>14</b>
2.1	RADIOAKTIVE ABFÄLLE IN DER SCHACHTANLAGE ASSE II.....	14
2.2	MYOGRAPHIE MIT KOSMISCHER STRAHLUNG .....	15
2.3	LYNKEOS TECHNOLOGY .....	16
2.4	LYNKEOS MYON-BILDGEBUNGSSYSTEM.....	17
<b>3 ANALYSETECHNIKEN</b> .....		<b>19</b>
3.1	GEANT4 MONTE CARLO SIMULATIONEN.....	19
3.1.1	Myon Generator für kosmische Strahlung.....	19
3.1.2	Simulationsgeometrie.....	20
3.1.3	Simulation der Monte-Carlo-Physik.....	21
3.2	MYOGRAPHISCHE ANALYSE.....	22
<b>4 ARBEITSPAKETE</b> .....		<b>25</b>
4.1	AP 1 – SIMULATIONS- UND ANALYSEENTWICKLUNG .....	25
4.2	AP 2 - BESTIMMUNG VON KERNMATERIAL IN VERSCHIEDENEN ABFALLGEMISCHEN .....	25
4.3	AP 3 - GEEIGNETE KOMBINATIONEN DER MYONENTOMOGRAPHIE MIT ANDEREN ZERSTÖRUNGSFREIEN MESSVERFAHREN .....	25
4.4	AP 4 - BERICHTE, PRÄSENTATION UND DISKUSSION DER ERGEBNISSE .....	25
<b>5 SIMULATIONSPLAN</b> .....		<b>26</b>
5.1	ORIENTIERUNG.....	26
5.2	DICHTE .....	26
5.3	HOHLRAUM-ERKENNUNG.....	27
5.4	PHASENGRENZEN .....	27
5.5	RADIOAKTIVE QUELLEN .....	27
5.6	MATERIALIDENTIFIKATION .....	28
5.7	KERNBRENNSTOFF .....	28
<b>6 ERGEBNISSE</b> .....		<b>29</b>
6.1	ORIENTIERUNG.....	29
6.2	DICHTE .....	33
6.3	HOHLRAUM-ERKENNUNG.....	36
6.4	PHASENGRENZEN .....	44
6.5	RADIOAKTIVE QUELLEN .....	51
6.6	MATERIALIDENTIFIKATION .....	54

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Auf		 <b>BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG</b>
NAAN	NNNNNNNNNNNNNN	NNAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	23420000				MAK	RB	0001	00		
Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachanlage Asse II mittels Myographie										Blatt:8

6.7	KERNBRENNSTOFF .....	59
<b>7</b>	<b>MULTIMODALES POTENZIAL .....</b>	<b>62</b>
7.1	MYONEN-CAPTURE-RÖNTGENSTRAHLEN .....	62
7.2	MYONEN-INDUZIERTER SPALTUNG .....	63
<b>8</b>	<b>SCHLUSSFOLGERUNG .....</b>	<b>65</b>
	<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>67</b>

Gesamtzahl der Seiten: 67

Tags: Myon, Myographie, Radioaktive Abfälle, Charakterisierung, Asse II, VBA



Projekt NAAN	PSP-Element NNNNNNNNNNNNNN	Funktion/Thema NNAAANN	Komponente AANNNA	Baugruppe AANN	Aufgabe AAAA	UA AA	Lfd Nr. NNNN	Auf NN
9A	23420000				MAK	RB	0001	00

Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachanlage Asse II mittels Myographie

**BGE**  
 BUNDESGESELLSCHAFT  
 FÜR ENDLAGERUNG  
  
 Blatt:9

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

- Abb. 1: Eine VBA-Konfiguration, wie sie für die Machbarkeitsstudie simuliert wurde. Abgebildet ist der interne 200-Liter-Behälter mit Betonabschirmung. .... 14
- Abb. 2: Schematische Darstellung von 1D-Beispielen der MAR- und MST-Modi der myographischen Bildgebung. In jedem Modus werden die Spurdetektoren und ihre optimalen Positionen in Bezug auf eine generische Struktur angezeigt. Diese Struktur hat ein einfaches Low-Z-Schüttgut (grau) mit einem Material mit hoher Ordnungszahl (rot) eingebettet. Jeder Modus wird im Text ausführlich beschrieben. .... 15
- Abb. 3: Das Lynkeos MIS vor der Auslieferung an das>NNL Central Laboratory im Jahr 2018. Abgebildet sind die beiden Detektorpaare mit einem 1-Tonnen-Traglast-Rollentisch in der Mitte. Auf der Unterseite des oberen Detektorpaares zeigt das unten links gezeigte Quadrat den aktiven Bereich des Systems an. Der Rest des Detektorbereichs stellt die Ausleseelektronik und Stromversorgung dar. .... 18
- Abb. 4: Erzeugte Myonenflussverteilung für Polarwinkel bis 80 Grad als Funktion des Impulses (links) und **die Flussverteilung für einen festen Polarwinkel  $\theta$  von 45 Grad (ca. 0,79 rad) als Funktion des Impulses  $p$** , wie er vom ADAMO-Experiment nachgewiesen wurde. .... 20
- Abb. 5: Illustration von zwei Geant4-Simulationen, die einen betongeschirmten VBA zeigen, der vertikal in einem System mit Horizontal-Myon-Detektoren steht (links) und einen betongeschirmten VBA mit unterschiedlichen Beton-, Wasser- und Luftfüllständen, die vertikal in einem System mit vertikalen Myon-Detektoren stehen (rechts). .... 21
- Abb. 6: Vereinfachtes 2D-Schema des myographischen Bildgebungsverfahrens, das die detektierten Myonenpositionen in allen vier Detektormodulen, die beiden Myonenspuren und die Ausbreitung dieser durch das voxelisierte Volumen zeigt. Der PoCA wird ebenfalls angegeben. Es ist zu beachten, dass der Streuwinkel zu Illustrationszwecken übertrieben wurde. In Wirklichkeit sind Streuwinkel typischerweise weniger als ein paar Grad. .... 23
- Abb. 7: Simulation einer betongeschirmten VBA mit Betonfüllung und 10cm Würfeln aus Luft, Stahl und Uran. Ein Schema dieser vertikalen VBA innerhalb des Detektors ist in Abb. 5 dargestellt. .... 29
- Abb. 8: Abgebildet sind 1cm dicke horizontale Scheiben durch die VBA im Bereich des 10cm Uranwürfels. Die horizontale (links) und vertikale (rechts) Ausrichtung der VBA werden beide gezeigt. In der horizontalen Ausrichtung ist aufgrund der schlechteren Auflösung in vertikaler Richtung auch ein leichter Schatten aus dem Stahlwürfel sichtbar. Die simulierten Daten entsprechen 4 Wochen realer Myonenexposition. Die Farbskala wurde auf jedem Bild geändert, um verschiedene Merkmale klarer zu identifizieren. .... 30
- Abb. 9: Abgebildet sind 1cm dicke horizontale Scheiben durch den VBA im Bereich des 10cm Stahlwürfels. Die horizontale (links) und vertikale (rechts) Ausrichtung der VBA werden beide dargestellt. In der horizontalen Ausrichtung sind auch Schatten aus dem Uran- und Luftwürfel sichtbar. Die simulierten Daten entsprechen 4 Wochen realer Myonenexposition. Wie zuvor wurde die Farbskala auf jedem Bild modifiziert, um verschiedene Merkmale deutlicher zu identifizieren. .... 31
- Abb. 10: Abgebildet sind 1cm dicke horizontale Scheiben durch den VBA im Bereich des 10cm Luftwürfels. Die horizontale (links) und vertikale (rechts) Ausrichtung des VBA werden beide dargestellt. In der horizontalen Ausrichtung stechen des Schatten Uran- und des Luftwürfels hervor. Die simulierten Daten entsprechen 4 Wochen realer Myonenexposition. Wie zuvor wurde die Farbskala auf jedem Bild modifiziert, um verschiedene Merkmale deutlicher zu identifizieren. .... 32
- Abb. 11: Abgebildet sind 1cm dicke horizontale Scheiben durch die Mitte (Mitte) des VBA. Die horizontale (links) und vertikale (rechts) Ausrichtung des VBA werden beide dargestellt. Hier wurde die Farbskala modifiziert, um die Stahltragkonstruktionen zu identifizieren. .... 32
- Abb. 12: Vier verschiedene VBA-Konfigurationen, die für die Machbarkeitsstudie simuliert wurden. Hellgrau und Grün stehen für Beton, Schwarz für Bitumen, Dunkelgrau für Zement und Rot für Schwerbeton. .... 33

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Auf	
NAAN	NNNNNNNNNNNNNN	NNA AANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	23420000				MAK	RB	0001	00	
Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachtanlage Asse II mittels Myographie									BGE BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG
									Blatt:10

- Abb. 13: Gezeigt sind 40cm dicke horizontale Scheiben durch jedes VBA-Szenario: Beton abgeschirmt und Beton gefüllt (oben links), Beton abgeschirmt und Bitumen gefüllt (oben rechts), Beton abgeschirmt und zementverfüllt (unten links) und Schwerbetonabschirmung und Beton gefüllt (unten rechts). Die gleiche Farbskala wurde verwendet, um den Vergleich zu erleichtern. .... 34
- Abb. 14: Beziehungen zwischen rekonstruierter Streudichte und Materialdichte für die vier Materialien, die bei der Abschirmung und Füllung von VBA verwendet werden. .... 35
- Abb. 15: Beziehung zwischen der rekonstruierten Myonenstreudichte und dem Kehrwert der Strahlungslänge des Materials. Es wird eine lineare Beziehung beobachtet..... 35
- Abb. 16: Simulationen der Konfiguration A (links) mit kubischen Hohlräumen von 30 cm, 10 cm und 2 cm innerhalb der Betonfüllung und Konfiguration B (rechts) mit kubischen Hohlräumen von 20 cm, 5 cm und 1 cm innerhalb der Betonfüllung. .... 36
- Abb. 17: Gezeigt sind 1 cm große horizontale Scheiben durch die Mitte der VBA für Konfiguration A (links) und Konfiguration B (rechts). Es wurde eine mit Beton gefüllte VBA verwendet. Das Bild erscheint um 180 Grad gedreht im Vergleich zu den Visualisationen in Abb. 16. .... 37
- Abb. 18: Gezeigt sind 1 cm große horizontale Scheiben durch die Mitte des VBA für Konfiguration A (links) und Konfiguration B (rechts). Es wurde ein mit Bitumen gefülltes VBA verwendet. Das Bild erscheint um 180 Grad gedreht im Vergleich zu den Simulationen in Abb. 16. Eine andere Farbskala wurde untersucht, um die Erkennungsfähigkeit zu verbessern. .... 38
- Abb. 19: Abgebildet sind 1cm horizontale Scheiben durch eine betongeschirmte VBA mit Betonfüllung, die basierend auf Konfiguration A gefüllt ist. Von links nach rechts sind die Laufzeiten 1 Tag, 2 Tage, 4 Tage, 1 Woche (alle obere Reihe), 2 Wochen, 4 Wochen, 8 Wochen und 16 Wochen (alle untere Reihe). Das Vorhandensein des 30 cm großen Hohlraums (der sich in der Nähe der Oberseite des Behälters befindet) und die Stützstrukturen werden zunehmend deutlicher. 40
- Abb. 20: Abgebildet sind 1cm horizontale Scheiben durch eine betongeschirmte VBA mit Betonfüllung, die basierend auf Konfiguration B gefüllt ist. Von links nach rechts sind die Laufzeiten 2 Tage, 4 Tage, 1 Woche, 2 Wochen (alle obere Reihe), 4 Wochen, 8 Wochen, 16 Wochen und 32 Wochen (alle untere Reihe). Das Vorhandensein des 20 cm großen Hohlraums (der sich in der Nähe der Oberseite des Behälters befindet) und die Stützstrukturen werden zunehmend deutlicher. .... 41
- Abb. 21: Abgebildet sind 1 cm horizontale Scheiben durch eine betongeschirmte VBA mit Bitumenfüllung, die basierend auf Konfiguration A gefüllt ist. Von links nach rechts sind die Laufzeiten 2 Tage, 4 Tage, 1 Woche, 2 Wochen (alle obere Reihe), 4 Wochen, 8 Wochen, 16 Wochen und 32 Wochen (alle untere Reihe). Das Vorhandensein des 30 cm hohlen Hohlraums (der sich in der Nähe der Oberseite des Behälters befindet) und die Stützstrukturen werden nur in den größeren Zeitskalen deutlich erkennbar. .... 42
- Abb. 22: Abgebildet sind 1 cm horizontale Scheiben durch eine betongeschirmte VBA mit 10 cm, 5 cm und 2 cm Hohlräumen, die nach 18 Tagen Myonenexposition in betonierter Füllung (links) und Bitumenfüllung (rechts) platziert sind. Die Farbskalen wurden für die Erkennung von Hohlräumen in jedem Material optimiert. .... 43
- Abb. 23: Beziehungen zwischen Hohlraumgröße und Abbildungsdauer in Beton- (rote Linie) und Bitumen (grüne Linie) als Füllmaterial..... 43
- Abb. 24: Konzeption eines vierseitigen MIS für die Zustandsüberwachung und Inspektion von 3m<sup>3</sup> Behältern für die UK Nuclear Industry. Diese Ausrichtung der Detektormodule ermöglicht eine große Flexibilität bei den erforderlichen Messungen, einschließlich der Identifikation der Phasengrenzen. .... 44
- Abb. 25: Ein Beispiel für ein VBA-Setup mit Betonabschirmmaterial und Schichten aus Beton, Wasser und Luft. Zur bessern Orientierung wird die vertikale Achse (z-Achse) angezeigt. .... 45
- Abb. 26: Durchschnittlich rekonstruierte Streudichte dargestellt als Funktion der Tiefe in Bezug auf die vertikale Achse, z. Die Abmessungen des Behälters und die Füllbeton-, Wasser- und Luftstände werden gezeigt. .... 46
- Abb. 27: Ergebnisse der Phasengrenzenanalyse für die fünf Szenarien ohne Winkelbeschränkung. .... 48



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Auf		 <b>BUNDEGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG</b>
NAAN	NNNNNNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	23420000				MAK	RB	0001	00		
Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachanlage Asse II mittels Myographie										Blatt:11

Abb. 28: Ergebnisse der Phasengrenzenanalyse für die fünf Szenarien mit einer Winkelbeschränkung zwischen 0° und 22° zur Horizontalen. ....	49
Abb. 29: Ergebnisse der Phasengrenzenanalyse für die fünf Szenarien mit einer Winkelbeschränkung zwischen 0° und 15° zur Horizontalen. ....	49
Abb. 30: Phasengrenzanalyse mit den Ergebnissen von 1 Woche (blau) der Myonendaten im Vergleich zu 8 Wochen (rot) für das Füllverhältnis von Betonwasser und -luft von 50:25:25. ....	50
Abb. 31: Phasengrenzanalysen für das Füllverhältnis von Betonwasser und -luft im Verhältnis 50:25 für 1 Woche (oben links), 2 Wochen (oben rechts), 4 Wochen (unten links) und 8 Wochen (unten rechts) simulierter Myonendaten. ....	51
Abb. 32: Schematische Darstellung der radioaktiven Quelle mit Beschreibung der Schlüsselkomponenten. ....	52
Abb. 33: Simulationen der radioaktiven Quelle mit dem äußeren Gussgehäuse (links) und der Ansicht des inneren Layouts (rechts). Die Quelle ist in der Mitte des Innenraums in einem Quellenhalter gelb dargestellt und von einer Bleidichtung (rot) umgeben. ....	52
Abb. 34: Gezeigt sind die Ergebnisse der Bildgebung einer radioaktiven Quelle in der Luft für 1 Tag und 4 Wochen Myonenexposition. Das Quellgehäuse wird innerhalb eines Tages beobachtet. Auch nach 4 Wochen ist es nicht möglich, eines der internen Merkmale zu erkennen. ....	53
Abb. 35: Eine Erweiterung der für Abb. 34 durchgeführten Studien mit Ergebnissen für 2 Tage, 4 Tage, 1 Woche, 2 Wochen und 8 Wochen simulierte Myonenexposition. ....	53
Abb. 36: Abgebildet sind 1cm horizontale Scheiben durch eine betongeschirmte VBA, die mit Beton gefüllt ist. In der Mitte der Basis befindet sich ein Behälter für radioaktive Quellen. Die vollständige VBA wird angezeigt (links) und ein vergrößerter Ausschnitt der Quelle (rechts) wird ebenfalls angezeigt. Die gestrichelte Linie stellt den Bereich des vergrößerten Ausschnittes dar. ....	54
Abb. 37: Abgebildet sind 1cm horizontale Scheiben durch eine betongeschirmte VBA, die mit Beton gefüllt ist. In der Mitte der Basis befindet sich ein Behälter für radioaktive Quellen. Diese werden für verschiedene Zeiträume gezeigt, die von 1 Tag bis 8 Wochen reichen. Diese sind auf den Ergebnissen gekennzeichnet. ....	55
Abb. 38: Abgebildet sind 1cm horizontale Scheiben durch eine betongeschirmte VBA, die mit Beton gefüllt ist. Diese stellen vergrößerte Ansichten der entsprechenden Ergebnisse aus Abb. 37 dar. ....	55
Abb. 39: Eine 1 cm dicke horizontale Scheibe durch eine betongeschirmte VBA mit Betonfüllung und fünf 5 cm großen Würfeln Blei (Pb), Stahl, Kupfer (Cu), Glas und Aluminium (Al). ....	56
Abb. 40: Eine 1cm horizontale Scheibe durch eine betongeschirmte VBA mit Betonfüllung und fünf 5cm Würfeln aus Blei, Stahl, Kupfer, Glas und Aluminium für Zeiträume von 1 Tag bis 4 Wochen... 57	57
Abb. 41: Verhältnis der Streudichte jedes Materials zur Betonstreudichte subtrahiert gegenüber der inversen Strahlungslänge jedes Materials. Die untersuchten Materialien sind Glas, Aluminium (Al), Stahl, Kupfer (Cu) und Blei (Pb). Die blauen Datenpunkte und die rote Linie zeigen Ergebnisse aus einer anfänglichen Fehleranalyse und grüne Datenpunkte und schwarze Linie sind aus einer verbesserten Analyse. ....	58
Abb. 42: Beziehung der Streudichte jedes Materials zur Betonstreudichte subtrahiert gegenüber der Dichte jedes Materials. Die untersuchten Materialien sind Glas, Aluminium (Al), Stahl, Kupfer (Cu) und Blei (Pb). Die blauen Datenpunkte und die rote Linie zeigen Ergebnisse aus einer anfänglichen Fehleranalyse und grüne Datenpunkte und schwarze Linie sind aus einer verbesserten Analyse. ....	59
Abb. 43: Ergebnis der Untersuchung der Fähigkeit zur Identifizierung kleiner Mengen Uran, welches homogen in einer mit Bitumen gefüllten VBA verteilt ist. Verschiedene Analysen wurden durchgeführt und ihre Ergebnisse in Abhängigkeit vom Urangehalt dargestellt. ....	60
Abb. 44: Illustration der Myon-Capture-Röntgenemission (links) und das Feynman-Diagramm für die Myon-induzierte Spaltung (rechts) von einem Nukleon, bezeichnet mit N. Hier werden Myonen	

Projekt NAAN	PSP-Element NNNNNNNNNNNNNN	Funktion/Thema NNAAANN	Komponente AANNA	Baugruppe AANN	Aufgabe AAAA	UA AA	Lfd Nr. NNNN	Auf NN		 <b>BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG</b>
9A	23420000				MAK	RB	0001	00		
Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachtanlage Asse II mittels Myographie										Blatt:12


$\mu^-$ , Elektronen als e- bezeichnet, Photonen  $\gamma$ , Z-Bosonen sind Z und die Spaltprodukte bestehen aus N' und dem emittierten Neutron n. .... 62

## ABKÜRZUNGSLISTE

<b>AP</b>	Arbeitspakete
<b>BGE</b>	Bundesgesellschaft für Endlagerung
<b>CAD</b>	Computer-Aided Design
<b>Abb.</b>	Abbildung
<b>FWHM</b>	Volle Breite bei halber Höhe (Full Width Half Maximum)
<b>KI</b>	Künstliche Intelligenz (Machine Learning)
<b>LLW</b>	Schwachaktive Abfälle (Low Level Waste)
<b>Lynkeos</b>	Lynkeos Technology Limited
<b>MAPMT</b>	Multi-Anode Photomultiplier Tube
<b>MAR</b>	Myon Absorption Radiographie
<b>MIS</b>	Myon Imaging System (Lynkeos Produkt)
<b>MST</b>	Myonenstreu-Tomographie
<b>NDA</b>	Nuclear Decommissioning Authority
<b>NNL</b>	National Nuclear Laboratory
<b>PoCA</b>	Punkt der nächsten Annäherung (Point of Closest Approach)
<b>F&amp;E</b>	Forschung und Entwicklung
<b>SNM</b>	Spezielle Kernmaterialien (Special Nuclear Materials)
<b>VBA</b>	Verlorene Betonabschirmung
<b>ZfP</b>	Zerstörungsfreie Prüfung (Non-destructive Testing)

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Auf
NAAN	NNNNNNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	23420000				MAK	RB	0001	00

Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachanlage Asse II mittels Myographie


**BUNDEGESELLSCHAFT  
FÜR ENDLAGERUNG**  
 Blatt:13

# 1 EINLEITUNG

Diese Studie wurde von der BGE (Bestellnummer 45194577 vom 04.12.2020 mit dem Titel "Prüfung der *Myonen Tomographie als Charakterisierungsmethode für die aus der Schachanlage Asse II rückzuziehenden radioaktiven Abfälle*") in Auftrag gegeben, um die Fähigkeiten und Machbarkeit der Myographie mit kosmischen Strahlen zur Unterstützung der Charakterisierung von Abfallpaketen zu untersuchen, die aus der Schachanlage Asse II in Deutschland geborgen werden müssen. Lynkeos ist ein schottisches Unternehmen, das sich auf diese schnell wachsende passive **Zerstörungsfreie Prüfung-** (ZfP) Technik spezialisiert hat. Lynkeos hat eine Reihe von Untersuchungen durchgeführt, die auf detaillierten Computersimulationen basieren. Die Ergebnisse werden in diesem Bericht vorgestellt und unterstreichen das Potenzial der Technik zur Unterstützung des zukünftigen Arbeitsprogramms an der Schachanlage Asse II.

Alle Hintergrundinformationen, die zum Verständnis der Methodik und der Ergebnisse dieser Studie erforderlich sind, einschließlich eines Überblicks über das bildgebende Verfahren der Myographie und die Technologie, die die Grundlage der Computersimulationen bildet, sind im Abschnitt 2 vorgestellt.

Abschnitt 3 enthält eine detaillierte Beschreibung der Analysetechniken, die während dieser Studie verwendet wurden. Dieser Abschnitt schließt auch den Geant4 Monte Carlo-Simulationsrahmens und die 3D-Myonen-Bildgebungsanalysen ein.


Abschnitt 4 skizziert die vier Arbeitspakete, aus denen diese Studie besteht. Er umfasst die Entwicklung der detaillierten Simulationen, die Analyse, die Diskussion der Ergebnisse und zukünftige Arbeiten sowie die gesamte Berichterstattung.

In Abschnitt 5 wird der mit der BGE für diese Studie vereinbarte Simulationsplan detailliert beschrieben. Insgesamt wurden sieben umfassende Simulationen entworfen und analysiert, um die Fähigkeit der Myographie zur Unterstützung der Charakterisierungsaktivitäten an der Asse II zu bewerten.

Abschnitt 6 stellt die Ergebnisse dieser Simulationen vor und diskutiert sie.

Abschnitt 7 diskutiert das Potenzial, ausgewählte Ergebnisse durch die Kombination von Myographie mit verschiedenen anderen Nachweistechniken zu verbessern.

Abschnitt 8 fasst die Studie zusammen und enthält die Schlussfolgerungen.

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Auf		 <b>BUNDEGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG</b>
NAAN	NNNNNNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	AAA	AA	NNNN	NN		
9A	23420000				MAK	RB	0001	00		Blatt:14
Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachtanlage Asse II mittels Myographie										

## 2 HINTERGRUNDINFORMATIONEN

Zum besseren Verständnis der Methodik und der Ergebnisse dieser Studie stellt dieser Abschnitt die notwendigen Hintergrundinformationen bereit. Dieser Abschnitt skizziert kurz die Herausforderung der Charakterisierung der radioaktiven Abfälle der Asse II und führt in die Technik der Myographie mit kosmischer Strahlung ein, mit der wir dieser Herausforderung begegnen wollen. In diesem Abschnitt wird die Firma Lynkeos beschrieben. Der Schwerpunkt liegt dabei auf unserer Technologie, die die Grundlage für die später beschriebenen Simulationsstudien bildet.

### 2.1 RADIOAKTIVE ABFÄLLE IN DER SCHACHTANLAGE ASSE II

In das ehemalige Kali- und Steinsalzbergwerk Asse II wurden im Zeitraum von 1967 bis 1978 rund **126 000 Gebinde schwach-** und mittelradioaktive Abfälle in 13 Einlagerungskammern eingelagert. Seit 1988 dringt Wasser in das Bergwerk ein. Es handelt sich um Grundwasser aus dem umliegenden Gestein. Es ist mit Steinsalz gesättigt und führt nicht zu einer Auflösung des Salzes im Bergwerk. Seit 2013 gibt es den gesetzlichen Auftrag, die eingelagerten radioaktiven Abfälle zurückzuholen. Nur so kann nach heutigem Stand die Langzeitsicherheit gewährleistet werden. Die BGE ist von der Bundesregierung beauftragt Aufgaben für die Endlagerung radioaktiver Abfälle wahrzunehmen und ist seit 2017 Betreiber der Schachtanlage Asse II. Als solcher ist die BGE verantwortlich für die Bergung, Charakterisierung, Konditionierung und Lagerung der rückgeholt radioaktiven Abfälle. Diese werden bis zu deren endgültigen Endlagerung in einem zukünftigen geologischen Endlager nach ihrer Bergung zwischengelagert.

Eine signifikante Anzahl der Behälter mit radioaktivem Abfall sind in Abschirmbeton (sogenannte: **Verlorene Betonabschirmung, VBA**) eingeschlossen. Dieser dient dazu, die Dosisleistung an der Oberfläche zu reduzieren. Eine VBA ist in Abb. 1 gezeigt. Die Dokumentation des Asse II-Abfallinventars ist spärlich und gibt oft nur Obergrenzen für radioaktive Quellen, Kernmaterial und geringe Mengen einzelner Abfälle an. Einige Arten radioaktiver Abfälle können kleine Mengen hoher spezifischer Aktivität enthalten, obwohl der Behälter ursprünglich als schwach radioaktiver Abfall eingestuft wurde.

Eine Charakterisierung dieser Behälter nach der Bergung ist unerlässlich. Die Myographie wird als Teil des nicht-invasiven Instrumentariums zur Charakterisierung dieser Behälter untersucht.

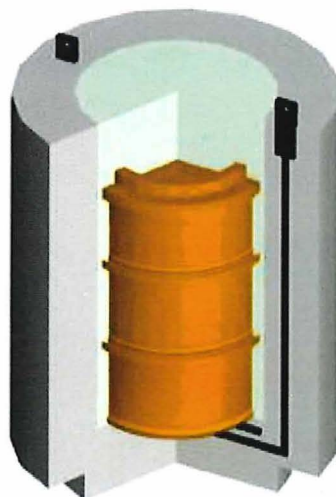


Abb. 1: Eine VBA-Konfiguration, wie sie für die Machbarkeitsstudie simuliert wurde. Abgebildet ist der interne 200-Liter-Behälter mit Betonabschirmung.

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Auf	BGE BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG
NAAN	NNNNNNNNNNNNNN	NNAANN	AANNNA	AANN	AAA	AA	NNNN	NN	
9A	23420000				MAK	RB	0001	00	Blatt:15
Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachtanlage Asse II mittels Myographie									

## 2.2 MYOGRAPHIE MIT KOSMISCHER STRAHLUNG

Die Myographie mit Hilfe kosmischer Strahlung oder kurz Myographie ist ein relativ neues Gebiet der zerstörungsfreien Prüfung, das in den letzten zehn Jahren rasant gewachsen ist. Die Technik nutzt natürlich vorkommende Hintergrundstrahlung in Form von Myonen – subatomare Teilchen, die durch Wechselwirkungen mit kosmischer Strahlung in der oberen Atmosphäre erzeugt werden – um die innere Zusammensetzung komplexer Strukturen passiv zu untersuchen. Mögliche Anwendungen reichen von kleinen, stark abgeschirmten Behältern bis hin zu großen Industrieanlagen und geologischen Strukturen, die mit herkömmlichen Inspektionstechniken in der Regel nur schwer angemessen beurteilt werden können [1].

Wie das bekanntere Elektron ist das Myon ein Mitglied der Teilchenfamilie der Leptonen. Es ist ein geladenes Teilchen mit einer Masse von über 200-mal der Elektronmasse, was Myonen extrem durchdringend macht – als solches können Myonen viele Kilometer Gestein durchdringen. Auf Meereshöhe beträgt der Fluss der Myonen etwa ein Myon pro Quadratcentimeter und Minute, das heißt, jeder Mensch wird in jeder Sekunde von etwa ein Dutzend Myonen harmlos durchdrungen. Myonen sind allgegenwärtig und haben typische Energien von mehreren GeV. Die Myographie beruht auf der Fähigkeit, Myonen durch das zu untersuchende Objekt oder die zu untersuchende Struktur zu verfolgen. Myographie unterscheidet zwei Hauptbildgebungsverfahren, die allgemein als **Myon Absorptions Radiographie (MAR)** und **Myonenstretomographie (MST)** bezeichnet werden. Diese sind in Abb. 2 vereinfachend dargestellt.

Das einfachste Bildgebungsverfahren ist die MAR, welche einen unabhängigen Myonen-Spur-Detektor erfordert, der hinter der Struktur platziert ist. Die einfallenden Spuren der nachgewiesenen Myonen werden gezählt, um daraus eine zweidimensionale Projektion durch die Struktur, analog zu einer medizinischen Röntgenaufnahme, zu erzeugen. Durch den Vergleich der nachgewiesenen Anzahl von Myonen mit einer auf die Anwendung abgestimmten Simulation ist es möglich, Abweichungen von der Simulation zu identifizieren. Ein Überschuss an Myonen, beispielsweise, der sich aus einer bestimmten Richtung ergibt, deutet darauf hin, dass die Dichte des Materials an diesem Ort geringer ist als modelliert. Dies könnte auf das Vorhandensein eines Hohlraums oder einer geringeren globalen Dichte in dieser Richtung hinweisen. MAR als Bildgebungstechnik beruht auf der dichteabhängigen Absorption von Myonen in Materialien - je dichter oder dicker ein Material

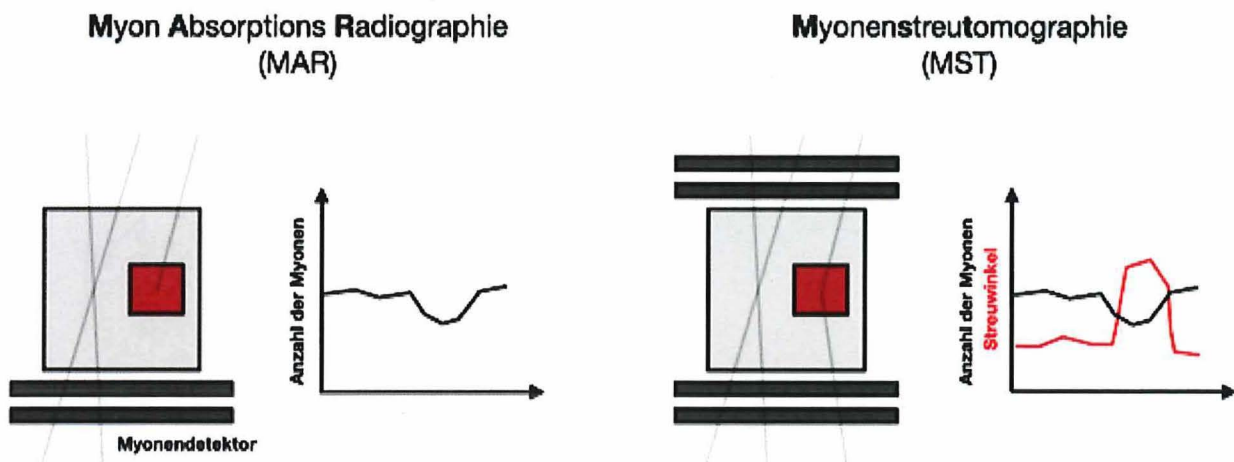



Abb. 2: Schematische Darstellung von 1D-Beispielen der MAR- und MST-Modi der myographischen Bildgebung. In jedem Modus werden die Spurdetektoren und ihre optimalen Positionen in Bezug auf eine generische Struktur angezeigt. Diese Struktur hat ein einfaches Low-Z-Schüttgut (grau) mit einem Material mit hoher Ordnungszahl (rot) eingebettet. Jeder Modus wird im Text ausführlich beschrieben.

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Auf	 <b>BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG</b>
NAAN	NNNNNNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	23420000				MAK	RB	0001	00	
Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachanlage Asse II mittels Myographie									Blatt:16

ist, desto mehr Myonen werden absorbiert. Durch die Platzierung mehrerer Paare von Spurdetektoren an verschiedenen Standorten ist es möglich, mehrere 2D-Projektionen zu erhalten, die dann kombiniert werden können. Dies ermöglicht es, ein grobes 3D-Bild zu erstellen. Diese Technik wird typischerweise für große Strukturen verwendet, um Informationen in der Größenordnung von mehreren zehn Zentimetern bis zu Metern an Auflösung zu erreichen.

Die MST hingegen erfordert zwei voneinander abhängige Spur-Detektoren auf beiden Seiten der zu untersuchenden Struktur. Wenn das geladene Myon die Materialien passiert, wird es über die Coulomb-Kraft der Atomkerne abgelenkt. Je größer die Dichte des Materials und je größer die Ordnungszahl  $Z$ , d.h. die Anzahl der positiv geladenen Protonen im Kern, desto größer die Abweichung. Durch die Messung der Flugbahn des ankommenden Myons und seiner Coulomb-gestauten Flugbahn kann der wahrscheinlichste Weg des Myons durch die Struktur abgeleitet werden. Dies wiederum liefert eine dreidimensionale Dichteverteilung der inneren Zusammensetzung der Struktur, die typischerweise als eine Reihe von dünnen Scheiben oder Tomogrammen durch die Struktur angezeigt wird. Diese Studie verwendet eine Farbskala, die die **Myonenstredichte**  $\lambda$  anzeigt. Die Myonenstredichte ist definiert als [2]:

$$\lambda = \frac{1}{X_0} = \rho \cdot Z \left[ \frac{(Z + 1) \log 287 / \sqrt{Z}}{A \cdot 716.4 \text{ g/cm}^2} \right]$$


und ist proportional zur **Materialdichte**  $\rho$  und Ordnungszahl  $Z$  und umgekehrt proportional zur Strahlungslänge  $X_0$  und der Massenzahl  $A$ . Diese Technik erfordert eine genaue Synchronisation beider Spur-Detektoren. Die gleichen Informationen, die aus der 2D-Radiographie gewonnen werden, werden als Nebenprodukt der 3D-Tomographie-Technik erhalten. Diese Technik wird typischerweise für kleinere Objekte verwendet, um Informationen mit Millimetraufklärung in der horizontalen Ebene und mit Zentimetraufklärung in den vertikalen Ebenen bereitzustellen. Die verringerte Auflösung in den vertikalen Ebenen ist ein Artefakt der verwendeten Methode, um den Punkt der nächsten Annäherung von zwei nahezu parallelen Teilchenspuren zu identifizieren.

## 2.3 LYNKEOS TECHNOLOGY

Lynkeos wurde im August 2016 als Spin-out Unternehmen der Universität Glasgow gegründet. Es ist das erste Unternehmen in Großbritannien, das sich auf Myographie spezialisiert hat. Lynkeos ist der führende kommerzielle Anbieter von zugehörigen Geräten und Dienstleistungen in Europa. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt besteht das Lynkeos-Team aus sechs Mitarbeitern und ist in Glasgow ansässig. Lynkeos plant weiteres Wachstum durch die Suche nach privaten Investitionen. Lynkeos, seine Mitarbeiter und das Forschungsprojekt, aus dem die Firma hervorgegangen ist, sind mehrfach ausgezeichnet und haben Pionierarbeit auf dem Gebiet der Myographie für Anwendungen in der Nuklearindustrie geleistet [3] [4] [5] [6] [7] [8] [9] [10] [11].

Lynkeos ist aus einem von der **Nuclear Decommissioning Authority (NDA)**-finanzierten F&E-Projekt zwischen der Universität Glasgow und **National Nuclear Laboratory (NNL)** in Höhe von £4,8 Millionen hervorgegangen. Im Rahmen dieses Projekt, welches von 2009 bis 2016 durchgeführt wurde, wurde die Fähigkeit zur passiven Charakterisierung abgeschirmter -Behälter für mittelradioaktive Abfälle – hauptsächlich 500-Liter-Fässer – entwickelt. Dieses Projekt gipfelte in der Entwicklung und erfolgreichen Demonstration eines Prototyp-Detektorsystems in Glasgow in voller Größe. Im Jahr 2017, kurz nach der Gründung, erhielt Lynkeos von Innovate UK einen *First Of A Kind Deployment of Innovation*-Vertrag in Höhe von £1,6 Millionen, um diese Technologie zu kommerzialisieren und die Installation und den ersten Einsatz von Myographie-Technologie in der globalen Nuklearindustrie durchzuführen. Dies wurde im Oktober 2018 im NNL-Zentrallabor am Standort Sellafield erreicht. Dieses **Myon Imaging System (MIS)**, dargestellt in Abb. 3, wurde



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Auf		 <b>BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG</b>
NAAN	NNNNNNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	23420000				MAK	RB	0001	00		

Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachtanlage Asse II mittels Myographie

Blatt:17

seitdem für verschiedene kommerzielle Bildgebungszwecke verwendet, einschließlich der Qualitätssicherung für die NNL Pilotanlage für den GeoMelt In-Container Vitrification-Prozess von Veolia Nuclear Solutions und zur Information von Designstudien für ein größeres MIS für die Zustandsüberwachung und Inspektion von Abfallverpackungen mit 3m<sup>3</sup> Volumen.

In der vorliegenden Studie für die BGE hat Lynkeos die Rolle der Myographie für die Charakterisierung von Abfallpaketen untersucht, die aus der Schachtanlage Asse II geborgen werden sollen.

## 2.4 LYNKEOS MYON-BILDGEBUNGSSYSTEM

Das Lynkeos MIS ist ein großflächiges, statisches Myographiesystem. Die Bautechniken sind ausführlich in [3] [5] beschrieben und im Folgenden kurz zusammengefasst.

Das MIS besteht aus zwei Detektormodulen oberhalb des Abbildungsvolumens und zwei darunter. Die oberen beiden Detektormodule definieren die Spur der eingehenden Myonen, die unteren Module dienen der Rekonstruktion der Spur der Coulomb-gestreuten Myonen. Das MIS basiert auf Szintillatortechnologie als Nachweismedium. Es hat zwei überlappende Schichten von Saint-Gobain BCF-12 szintillierenden Kunststofffasern, die sowohl in x- als auch in y-Richtung in einem Raster von 2 mm angeordnet sind. Für jede x- (oder y-) Schicht sind die Fasern so angeordnet, dass die untere Schicht die Stütze für die obere Schicht bildet. Bei 512 Fasern in jeder Schicht bilden insgesamt 1024 Fasern eine Detektionsschicht, z.B. jede x-Richtungsschicht. Dies führt zu insgesamt 1 048 576 möglichen Myonen-Interaktionspunkten pro Modul. Die aktive Fläche des Systems beträgt 1066 mm × 1066 mm. Die Grundsicht aus Fasern in x- und y-Richtung ist optisch mit einem speziell bearbeiteten Stück Rohacell® Schaumstoff verbunden. Diese Form stellt präzise orthogonale Reihen von 512 V-förmigen Nuten mit einem Raster von 2,08 mm auf der Ober- und Unterseite her und garantiert die Präzision der Faseranordnung.

Das verwendete Szintillatormaterial ist ein Kunststoff, der mit Fluor dotiert wurde. Wenn dieses Szintillatormaterial von einem geladenen Teilchen wie einem Myon getroffen wird, absorbiert es einen Teil der Teilchenenergie und emittiert diese absorbierte Energie in Form von sichtbaren Photonen. Dieses Lichtsignal ist spezifisch für die Faser, welche von dem Myon getroffen wurde. Um diese Faser zu identifizieren, müssen wir diese Lichtsignale nachweisen. Das in den Fasern erzeugte Szintillationslicht unterliegt der Totalreflexion im Inneren der Faser durch die gesamte ummantelte Länge und wird am offenen Ende aus der Faser emittiert. Das Licht wird dort durch einen Photodetektor nachgewiesen. Das MIS erreicht dies durch die optische Kopplung der einzelnen Fasern an Pixel auf einem 64-Kanal Hamamatsu H12700A **Multi-Anode Photomultiplier Tube (MAPMT)**. Zwei Fasern werden auf einen Pixel geleitet und dann in der Rekonstruktionssoftware entkoppelt. Jedes Modul verfügt über 16 MAPMTs.

Die Signale jeder MAPMT werden von Standardelektronik ausgelesen und für die Analyse digitalisiert. Die Elektronik ist Standard in vielen Instrumenten, die in der Kern- und Teilchenphysik verwendet werden.

Der Rahmen und die Stützstrukturen des Detektors sind alle aus Aluminiumprofilen von Bosch-Rexroth gefertigt. Abgerundet wird das System durch einen externen Rollentisch zum Be- und Entladen sowie eine aus Aluminium gegossene Palette. Die Palette und der Rollentisch wurden von Lloyds British für eine Last von einer metrischen Tonne ausgelegt.

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Auf	
NAAN	NNNNNNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	23420000				MAK	RB	0001	00	

Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachtanlage Asse II mittels Myographie

Blatt:18




Abb. 3: Das Lynkeos MIS vor der Auslieferung an das NNL Central Laboratory im Jahr 2018. Abgebildet sind die beiden Detektorpaare mit einem 1-Tonnen-Traglast-Rollentisch in der Mitte. Auf der Unterseite des oberen Detektorpaares zeigt das unten links gezeigte Quadrat den aktiven Bereich des Systems an. Der Rest des Detektorbereichs stellt die Ausleseelektronik und Stromversorgung dar.

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Auf	
NAAN	NNNNNNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	23420000				MAK	RB	0001	00	

Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachtanlage Asse II mittels Myographie

Blatt:19


**BUNDEGESELLSCHAFT  
FÜR ENDLAGERUNG**

### 3 ANALYSETECHNIKEN

Die in diesem Bericht vorgestellte Studie besteht aus Analysen von sieben verschiedenen Szenarien, die in diesem Abschnitt 3 beschrieben werden. Alle Simulationen wurden mit dem Softwarepaket Geant4 durchgeführt. Dieser Software-Rahmen wurde am CERN für die realistische Vorhersage des Transports von Teilchen durch Materie mit Monte-Carlo-Techniken entwickelt. Lynkeos hat die hohe Konsistenz zwischen seiner Simulationssoftware basierend auf Geant4 und experimentellen Daten, die mit seiner MIS- und Analysesoftware analysiert wurden, verifiziert. Jede dieser Analysetechniken und die benutzten Softwarerahmen werden in diesem Abschnitt beschrieben.

#### 3.1 GEANT4 MONTE CARLO SIMULATIONEN

Geant4 [12] ist ein Instrumentarium zur Simulation des Durchgangs von Teilchen durch Materie. Zu den Anwendungsgebieten gehören Hochenergie-, Kern- und Beschleunigerphysik sowie Studien in der Medizin und den Weltraumwissenschaften. Es stützt sich auf physikalische Modelle in Softwarebibliotheken, die auf vielen Jahrzehnten experimenteller Daten basieren, um reale Phänomene genau modellieren zu können. Im Kontext dieser Studie umfasst dies detaillierte Myonenstreuungs- und Absorptionsdaten, die sicherstellen, dass wir diese Prozesse für Myographiezwecke genau simulieren können. Lynkeos hat seine Myographie-Simulationssoftware im Laufe eines Jahrzehnts entwickelt und optimiert. Es hat sich gezeigt, dass sie bei der Vorhersage experimenteller Ergebnisse der Myographie für nukleare Abfallbehälter zuverlässig ist.

Das Lynkeos Simulations-Softwarepaket ist in drei Teile unterteilt:


1. Myongenerator für kosmische Strahlung
2. Simulationsgeometrie
3. Simulation der Wechselwirkungen durch Monte-Carlo-Methoden.

##### 3.1.1 Myon Generator für kosmische Strahlung

Zu Beginn der Simulation ist es wichtig, eine realistische Myonen-Verteilung erzeugen zu können, die ihre Eigenschaften auf Meereshöhe widerspiegeln. Dazu gehören wichtige, miteinander korrelierte Parameter wie der Fluss, die Winkelverteilungen und das Impuls/Energie Spektrum. Für die in diesem Bericht enthaltenen Studien wurden die Messungen des ADAMO-Detektors [13] aus den Jahren 2003 und 2004 zur Grundlage des Modells im Monte-Carlo-Myongenerator genommen. Diese Messungen wurden mit einem Magnetischen Spektrometer zur Impuls- und Winkelmessung durchgeführt. Das Spektrometer wurde auf einer geographischen Breite von etwa 42 Grad Nord platziert und nach Norden ausgerichtet. Der Impulsbereich erstreckte sich über den Bereich von 100 MeV/c bis 130 GeV/c, während der Polarwinkelbereich 0 - 80 Grad betrug. In dieser Beschreibung polarer Winkel bezieht sich 0 Grad auf Myonen, die sich vertikal in Richtung Meeresspiegel bewegen (senkrechter Einfall auf die Oberfläche), und 90 Grad charakterisiert Myonen, die sich horizontal bewegen.

Wir stützen unsere Simulationen auf diese experimentellen Daten, da sie einen weiten Bereich sowohl im Impuls- als auch Polarwinkelbereich, gemessen mit einem einzigen Instrument, darstellen. Dies minimiert den Effekt instrumenteller Systematik, die durch die Kombination von Messungen von Myonendaten durch mehrere Detektoren an mehreren Orten entstehen kann.

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Auf	
NAAN	NNNNNNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	23420000				MAK	RB	0001	00	


**BUNDESGESELLSCHAFT  
FÜR ENDLAGERUNG**

Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachtanlage Asse II mittels Myographie
Blatt:20

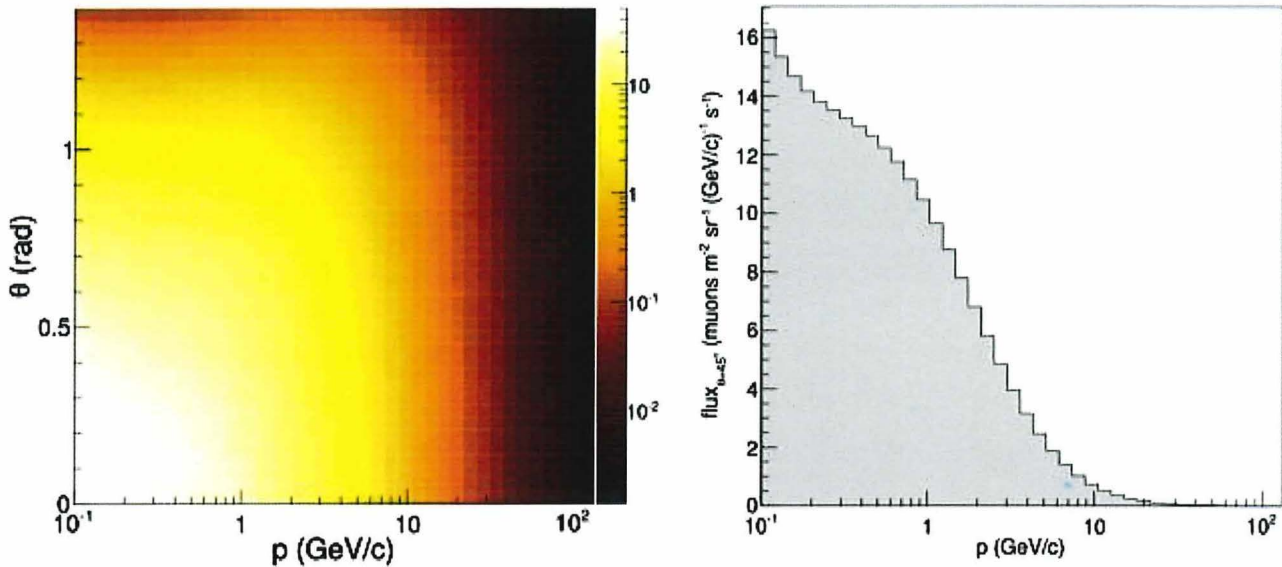


Abb. 4: Erzeugte Myonenflussverteilung für Polarwinkel bis 80 Grad als Funktion des Impulses (links) und die Flussverteilung für einen festen Polarwinkel  $\theta$  von 45 Grad (ca. 0,79 rad) als Funktion des Impulses  $p$ , wie er vom ADAMO-Experiment nachgewiesen wurde.

Darüber hinaus ergibt dies eine konsistente Schätzung des vertikalen Flusses sowie des nahezu horizontalen Flusses, was in dieser Studie, die beide Bereiche auch vergleichend untersucht, von besonderer Bedeutung ist.

Die im Monte-Carlo-Myongenerator implementierte Flussverteilung ist in Abb. 4 sowohl als Funktion des Impulses und des Polarwinkels als auch als Funktion des Impulses für einen festen Polarwinkel von 45 Grad oder ca. 0,79 rad dargestellt. Für jedes Simulationsereignis werden für jedes Myon Impuls und Polarwinkel zufällig aus dieser Verteilung in einer Erzeugungsoberfläche, die in der Nähe des obersten Detektors platziert ist, generiert. Das stellt sicher, dass die Gesamtheit aller simulierten Myonen, die den Detektor und den Abfallbehälter passieren, eine möglichst genaue Darstellung echter Myonen ist.

### 3.1.2 Simulationsgeometrie

Sobald eine Verteilung von Myonen erzeugt ist, werden diese Myonen durch eine Geant4-Simulation geleitet, die das Detektorsystem und die untersuchten Abfallbehälter enthält. Mehrere Beispiele aus den in diesem Bericht durchgeführten Studien sind in Abb. 5 zur Veranschaulichung dargestellt.

Die Detektoren werden aus einzelnen Szintillationsfasern mit vorgegebener Länge und Durchmesser sowie einer spezifischen Detektormodulposition aufgebaut. Diese Parameter können auf die spezifische Anwendung abgestimmt werden. Die Geometrie spiegelt die doppelte Faserschicht im X- und Y-Schicht raster genau wider. Details der Photosensoren und Ausleseelektronik werden nicht simuliert. Stattdessen werden die getroffenen Fasern in jedem der vier Detektormodule identifiziert und zur Bildung der eingehenden- und gestreuten Myonenspuren verwendet. Unsicherheiten in der Messung, wie etwa Rauschen im System, einschließlich falsch identifizierter Signale, kleiner Fehlrichtungen und elektronischem Rauschen, werden ebenfalls in die Simulation einbezogen. Sie folgen einem Abgleich mit experimentellen Daten, die mit dem MIS in Glasgow gewonnen wurden.

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Auf	
NAAN	NNNNNNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	23420000				MAK	RB	0001	00	

Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachtanlage Asse II mittels Myographie

Blatt:21

**BUNDESGESELLSCHAFT  
FÜR ENDLAGERUNG**

Schließlich wird die Geometrie des Abfallbehälters im Detektoraufbau simuliert. Diese wurde als **Computer Aided Design-** (CAD) Datei importiert, die auf Grundlage von Angaben der BGE (Zeichnungen aus den Annahmebedingungen der Schachtanlage Asse von 1975) von der BGE zur Verfügung gestellt wurde.

### 3.1.3 Simulation der Monte-Carlo-Physik

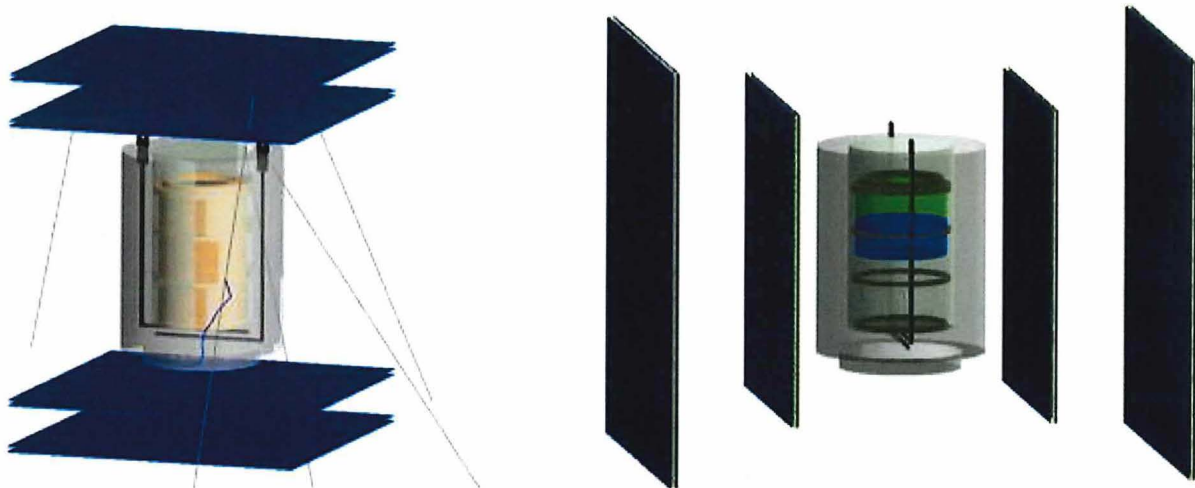


Abb. 5: Illustration von zwei Geant4-Simulationen, die einen betongeschirmten VBA zeigen, der vertikal in einem System mit Horizontal-Myon-Detektoren steht (links) und einen betongeschirmten VBA mit unterschiedlichen Beton-, Wasser- und Luftfüllständen, die vertikal in einem System mit vertikalen Myon-Detektoren stehen (rechts).

Durch die generierte Myonenverteilung und durch die Geometrie und Materialzusammenstellung von Detektor und Abfallbehälter in der Simulation kann der Transport von Myonen durch diese Geometrie wirklichkeitsgetreu simuliert werden. Dies funktioniert auf Ereignisbasis, wobei ein Ereignis ein zufälliges Myon darstellt, dessen Weg und dessen Wechselwirkungen durch die Detektoren und den Behälter verfolgt wird. Aus einer zufälligen Position in der Myonenerzeugungsebene wird ein Myon mit einem zufälligen Impuls und Polarwinkel gemäß der 3D-Verteilung in Abb. 4 gewählt. Dies wird dann in kleinen diskreten Schritten durch die Simulation geführt. Nach jedem Schritt werden Monte-Carlo-Techniken verwendet, um die Wahrscheinlichkeit mit dem verschiedenen physikalischen Prozesse und Wechselwirkungen auftreten, zu berechnen und den nächsten diskreten Schritt zu simulieren. Diese Wahrscheinlichkeiten hängen von vielen Faktoren ab, einschließlich der Energie des Myons und des Materials, in dem es sich befindet. Alle Wahrscheinlichkeiten werden aus Erfahrungsdaten, akkumuliert in Geant4, berechnet. Dies schließt Daten und Modelle aus verschiedenen Myonenstreuexperimenten und physikalischer Theorie ein.

Nachdem ein Myon die gesamte Simulation durchlaufen hat und im untersten Detektor nachgewiesen wurde, wird das nächste Myon zufällig generiert. Dieser Vorgang wird fortgesetzt, bis eine voreingestellte Anzahl von Myonen den Detektor passiert hat oder eine voreingestellte Dauer erreicht wurde. Die Daten werden dann in Form von Myonenspuren zur Analyse ausgegeben.

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Auf	
NAAN	NNNNNNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	23420000				MAK	RB	0001	00	
Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachanlage Asse II mittels Myographie									BGE BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG
									Blatt:22

### 3.2 MYOGRAPHISCHE ANALYSE

Weltweit existieren viele myographische Bildgebungsalgorithmen. Die geschäftsgeheimen 3D-Bildgebungsfunktionen von Lynkeos gelten als führend auf diesem Gebiet. Im Folgenden diskutieren wir auf allgemeiner Ebene die Prinzipien der MST-Bildgebungstechnik, welche verwendet wurden, um die in diesem Bericht gezeigten Ergebnisse zu erzielen.

Die Beschreibung des Prozesses folgt dabei Abb. 6. Für jedes Myon, das das MIS passiert, identifizieren wir die Fasern, die in jedem der vier Detektormodule getroffen wurden. Diese werden dann verwendet, um die kartesischen Koordinaten (x, y, z) der nachgewiesenen Myonenpositionen oder Treffer zu identifizieren. Die Treffer in den oberen beiden Modulen, die als (x1, y1, z1) bzw. (x2, y2, z2) bezeichnet werden, werden verwendet, um die eingehende Spur zu bilden. Sie wird als Vektor A bezeichnet. In ähnlicher Weise wird Vektor B aus den Treffern im unteren Modulpaar gebildet.

Das Volumen zwischen den Detektoren ist in kleine Volumenelemente unterteilt, die Voxel genannt werden. Die Abmessungen dieser Voxel können auf die Anwendung, die Bildgebungszeitskalen und die gewünschte Auflösung des Endbenutzers zugeschnitten werden.

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Auf	
NAAN	NNNNNNNNNNNN	NNAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	23420000				MAK	RB	0001	00	

Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachanlage Asse II mittels Myographie

Blatt:23

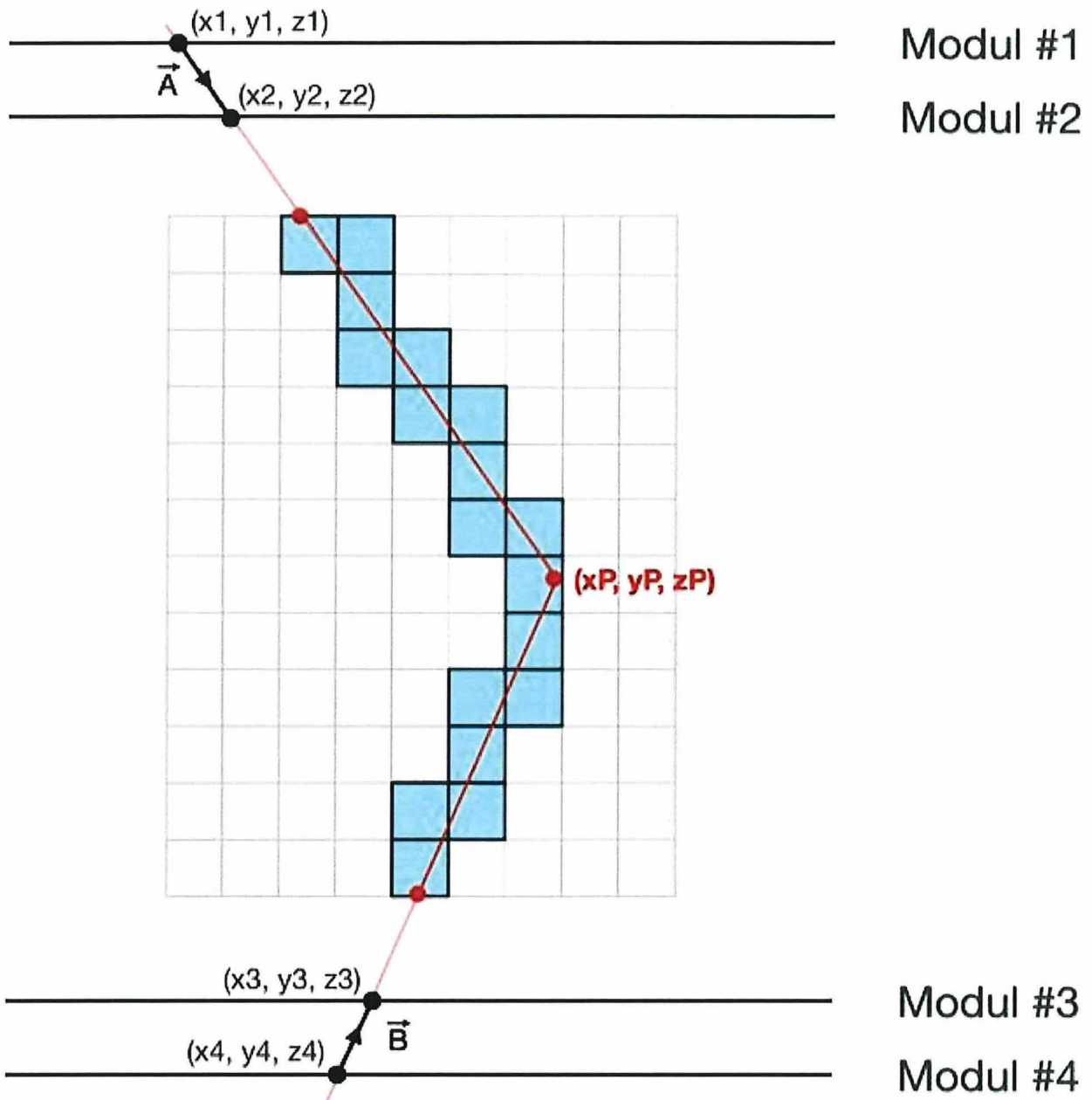


Abb. 6: Vereinfachtes 2D-Schema des myographischen Bildgebungsverfahrens, das die detektierten Myonenpositionen in allen vier Detektormodulen, die beiden Myonenspuren und die Ausbreitung dieser durch das voxelisierte Volumen zeigt. Der PoCA wird ebenfalls angegeben. Es ist zu beachten, dass der Streuwinkel zu Illustrationszwecken übertrieben wurde. In Wirklichkeit sind Streuwinkel typischerweise weniger als ein paar Grad.

Sind einmal die Vektoren A und B definiert, werden sie in das Abbildungsvolumen fortgesetzt. Mit geometrischen Techniken wird der Punkt der nächsten Annäherung (**P**oint of **C**losest **A**pproachment, PoCA) dieser beiden Vektoren bestimmt. Dieser ist gekennzeichnet als  $(x_P, y_P, z_P)$ . Daraus folgt eine Serie von Voxel, durch die die Myon-Spur verläuft. Die Wahrscheinlichkeit der Streuung in jedem Voxel wird berechnet und zur Bestimmung der Streudichte, bezeichnet als  $\lambda$ , verwendet (siehe Abschnitt 2.2). In der Summe vieler Myonen wird der durchschnittliche Wert  $\lambda$  in jedem Voxel

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Auf	
NAAN	NNNNNNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	23420000				MAK	RB	0001	00	
Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachtanlage Asse II mittels Myographie									BGE BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG
									Blatt:24

berechnet. Dieser wird dann verwendet, um 3D-Bilder zu konstruieren, die dann als 2D-Projektionen oder Schnitte in der X-, Y- oder Z-Ebene dargestellt werden können.

Auf der Grundlage des Lynkeos MIS-Detektordesigns und der geometrischen Konfiguration wird eine typische Abbildungs- und Lokalisierungsgenauigkeit verschiedener Materialien und die Bestimmung ihrer Abmessungen in der Größenordnung einiger Millimeter in der Ebene orthogonal zur primären Myoneneinfallrichtung und einiger Zentimeter in der parallelen Ebene erreicht. Dies erklärt sich dadurch, dass wenn die Detektoren horizontal ausgerichtet sind und über bzw. unter dem Behälter platziert sind, die primäre Richtung der Myonenbewegung in der z-Richtung ist. Wir erhalten daher die schlechteste Auflösung in den xz- und yz-Ebenen. Wenn die Detektoren vertikal ausgerichtet sind und auf beiden Seiten eines Behälters platziert sind, liegt die primäre Richtung der Myonenbewegung in x- (oder y-) Richtung.

Die schlechtere Auflösung ist eine Folge der Verschmierung und Dehnung des Bildes. Dies ist ein inhärenter Effekt, der mit der Rekonstruktion der Streuposition in der Primärachse von zwei nahezu parallelen Spuren verbunden ist. Bei größeren Detektoren und größerer Detektorakzeptanz (z.B. durch näheres Zusammenstellen von Detektorpaaren) kann diese Verschmierung minimiert werden.



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Auf	
NAAN	NNNNNNNNNNNNNN	NNAANN	AANNA	AANN	AAA	AA	NNNN	NN	
9A	23420000				MAK	RB	0001	00	
Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachanlage Asse II mittels Myographie									BGE BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG
									Blatt:25

## 4 ARBEITSPAKETE

Diese Studie besteht aus vier **Arbeitspaketen** (AP), die in den folgenden Unterabschnitten beschrieben werden. Im Rahmen dieser Studie wurden sieben verschiedene Simulationen im Simulationsplan vereinbart und durchgeführt. Dieser Simulationsplan wird in Abschnitt 5 beschrieben.

### 4.1 AP 1 – SIMULATIONS- UND ANALYSEENTWICKLUNG

Dieses AP enthält die Entwicklung einer VBA-Simulation in Geant4 und der notwendigen analytischen Techniken für die Datenanalyse (AP 1.1). Die erste durchgeführte Simulation konzentrierte sich auf die Untersuchung des Nachweises von Materialien mit hoher Dichte / hoher Ordnungszahl innerhalb dieses Simulationsrahmens (AP 1.2).

### 4.2 AP 2 - BESTIMMUNG VON KERNMATERIAL IN VERSCHIEDENEN ABFALLGEMISCHEN

Dieses Paket beinhaltet eine Studie über die Nachweisfähigkeit in Abhängigkeit der Menge von Kernbrennstoff (hier Uran), der homogen in das Abfallgemisch gemischt wurde, von 200 g pro 100 kg (0,200% Urangehalt) bis hinunter zu 15 g pro 100 kg (0,015 %) unter Verwendung der in AP 1.1 entwickelten Simulation und Methoden.

### 4.3 AP 3 - GEEIGNETE KOMBINATIONEN DER MYONENTOMOGRAPHIE MIT ANDEREN ZERSTÖRUNGSFREIEN MESSVERFAHREN

Um die Charakterisierung zu verbessern, kann die Myographie mit anderen zerstörungsfreien Messmethoden kombiniert werden. Hier wurde eine Literaturstudie zur Untersuchung solcher multimodalen Fähigkeiten durchgeführt und neben relevanten Fallstudien präsentiert.


### 4.4 AP 4 - BERICHTE, PRÄSENTATION UND DISKUSSION DER ERGEBNISSE

Dieses AP bestand aus der Erstellung und Präsentation von Berichten und der Diskussion mit BGE.

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Auf	
NAAN	NNNNNNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	23420000				MAK	RB	0001	00	

Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachtanlage Asse II mittels Myographie

Blatt:26


**BUNDESGESELLSCHAFT  
FÜR ENDLAGERUNG**

## 5 SIMULATIONSPLAN

Für diese Studie und für die zuvor vorgestellten AP wurden sieben separat simulierte Szenarien entwickelt. Diese sind in den Abschnitten 5.1 bis 5.7 beschrieben.

Für die Zwecke dieser Simulationen gehen wir davon aus, dass eine typische Messung etwa 2 Wochen dauern wird. Aus diesem Grund entspricht ein typischer simulierter Datensatz 2 Wochen Datenerfassung. Die Abhängigkeit der Ergebnisse von der Messdauer wird untersucht, indem Datensätze für kürzere und längere Zeiträume simuliert werden, um die Zeitabhängigkeit besser zu veranschaulichen. Für diese Studien werden die Zeitbereiche, wenn notwendig, zusammengefasst.

Die simulierte Detektorkonfiguration besteht aus zwei horizontalen Modulen mit ausreichender Größe über und unter dem VBA. Die Detektoren basieren auf der in Abschnitt 2.4 eingeführten Technologie und umfassen doppelschichtige szintillierende Fasern mit einem Faser-Durchmesser von 3 mm. Wenn im Weiteren die Messung von Phasengrenzen gefordert ist, sind vertikale Detektoren notwendig. In der Simulation werden die gleichen Detektormodule in vertikaler Orientierung simuliert, um diesen Anforderungen zu entsprechen. Wenn es die Simulation erfordert, werden die Detektorgröße, der Durchmesser der Fasern, der Abstand zwischen den Detektoren und die Anzahl der Detektoren zur Optimierung der Ergebnisse entsprechend angepasst.

Die erste Untersuchung konzentriert sich auf die optimale Ausrichtung des VBA im Detektorsystem – entweder horizontal oder vertikal. Alle nachfolgenden Untersuchungen verwenden die so gefundene optimale Orientierung.

Die Ergebnisse dieser Simulationen werden in Abschnitt 6 erläutert.

### 5.1 ORIENTIERUNG

Ziel dieser Simulationsstudie ist es, die 3D-Rekonstruktion von VBA zu vergleichen, die vertikal und horizontal innerhalb des Detektors positioniert sind. Als Ergebnis wird eine datenbasierte Empfehlung der optimalen Orientierung zur Verfügung gestellt. Für die Durchführung dieser Studie wurden zwei Szenarien betrachtet:

- Horizontal ausgerichtete VBA mit Betonabschirmung und Betonfüllung. Im Inneren werden ein Hohlraum, ein Objekt mittlerer Dichte (Stahl) und ein Objekt mit hoher Dichte (Uran) platziert. Jedes dieser Objekte soll groß genug sein, um leicht erkannt zu werden. Daher wurde eine Größe von 10 cm Durchmesser gewählt.
- Vertikal ausgerichtetes VBA mit Betonabschirmung und Betonfüllung. Die gleichen Hohlraum-, Stahl- und Uranobjekte wurden im Inneren platziert, um einen direkten Vergleich zu ermöglichen.

### 5.2 DICHTEN

Ziel dieser Studie ist es, die Materialdichte zu messen und eine Materialidentifikation für verschiedene Kombinationen von Abschirmung und Füllmaterial einer VBA durchzuführen. Es wird die gleiche Geometrie verwendet. Die erzielten Ergebnisse zeigen das Potenzial, zwischen verschiedenen Abschirm- und Füllmaterialien einer VBA zu unterscheiden. Für die Durchführung dieser Studie wurden vier Szenarien betrachtet (zuvor in Abb. 1):

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Auf	
NAAAN	NNNNNNNNNNNNNN	NNAAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	23420000				MAK	RB	0001	00	
Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachanlage Asse II mittels Myographie									BGE BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG Blatt:27

- VBA mit Betonabschirmung (Dichte = 2,40g/cm<sup>3</sup>) und Betonfüllmaterial
- VBA mit Betonabschirmung und Zementfüllmaterial (Dichte = 2,08g/cm<sup>3</sup>)
- VBA mit Betonabschirmung und Bitumenfüllmaterial (Dichte = 1,04g/cm<sup>3</sup>)
- VBA mit schwerer Betonabschirmung (Dichte = 3,20g/cm<sup>3</sup>) und Betonfüllmaterial.

### 5.3 HOHLRAUM-ERKENNUNG

Ziel dieser Studie ist es, die Größe von Hohlräumen oder Kavitäten zu bestimmen, die innerhalb einer bestimmten Messzeit nachgewiesen werden können. Die Analyse resultiert in einem Zusammenhang, der die Beziehung zwischen der minimal erkennbaren Hohlraumgröße und der Messzeit beschreibt. Für die Durchführung dieser Studie wurden zwei Szenarien betrachtet:

- Vertikale VBA mit Betonabschirmung mit Betonfüllmaterial mit kubischen Hohlräumen mit Seitenlängen von 1cm, 2cm, 5cm, 10cm, 20cm und 50cm. Es wird eine Messzeit von vier Wochen angenommen und die entsprechenden Daten verwendet.
- Vertikale VBA mit Betonabschirmung mit Bitumenfüllmaterial mit kubischen Hohlräumen mit Seitenlängen von 1cm, 2cm, 5cm, 10cm, 20cm und 50cm. Es wird eine Messzeit von vier Wochen angenommen und die entsprechenden Daten verwendet.

### 5.4 PHASENGRENZEN

Ziel dieser Studie ist es, die Fähigkeit zu untersuchen, die Phasengrenzen zwischen Beton, Wasser und Luft innerhalb einer VBA zu erkennen und zu vermessen. Die Analyse resultiert in einem Zusammenhang, der die Beziehung zwischen der Messung dieser Phasengrenzen als Funktion der Messzeit zeigt. Für die Durchführung dieser Studie wurden fünf Szenarien betrachtet:

- Vertikale VBA mit Betonabschirmung mit Betonfüllmaterial und Wasser- und Luftschichten. Horizontale Detektoren werden links und rechts von der VBA installiert. Die verschiedenen verwendeten Beton-, Wasser- und Luftgehalte als Prozentsatz des gesamten Behältervolumens sind:
  - 90% Beton, 10% Wasser und keine Luft
  - 80% Beton, 20% Wasser und keine Luft
  - 80% Beton, kein Wasser und 20% Luft
  - 50% Beton, 25% Wasser und 25% Luft
  - 40% Beton, 30% Wasser und 30% Luft.


### 5.5 RADIOAKTIVE QUELLEN

Ziel dieser Studie ist es, den Nachweis verschiedener Behälter mit radioaktiven Quellen zu demonstrieren. Der Lieferumfang sind 3D-Bilder dieser verpackten Quellen. Für die Durchführung dieser Studie wird ein Szenario in Betracht gezogen:

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Auf	
NAAN	NNNNNNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	23420000				MAK	RB	0001	00	

Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachtanlage Asse II mittels Myographie

Blatt:28


**BUNDESGESELLSCHAFT  
FÜR ENDLAGERUNG**

- VBA mit 10 verschiedenen Stahlbehältern mit radioaktiven Quellen.

## 5.6 MATERIALIDENTIFIKATION


Ziel dieser Studie ist es, verschiedene Materialien innerhalb von Beton innerhalb einer VBA bekannter Geometrie zu identifizieren. Die Analyse zeigt die Beziehung zwischen der Rekonstruktion verschiedener Materialien für verschiedene Zeitskalen. Zur Durchführung dieser Studie wird ein Szenario simuliert:

- VBA mit Betonabschirmung und Betonfüllmaterial mit Blei, Stahl, Kupfer, Glas und Aluminiumobjekten im Inneren. Dies werden Würfel mit einer Seitenlänge von 5 cm sein.

## 5.7 KERNBRENNSTOFF

Ziel dieser abschließenden Studie ist es, die Fähigkeit zu untersuchen, die Überreste von Kernbrennstoffen zu identifizieren, die homogen im Inhalt einer VBA verteilt sind. Insbesondere wird die Nachweisgrenze für fein verteilten Kernbrennstoff ermittelt. Anhand von Daten aus vier Wochen Messzeit werden verschiedene Szenarien untersucht:

- VBA mit schwerer Betonabschirmung, Bitumen als Füllmaterial und verschiedenen Mengen von im Inneren verteiltem Uran. Die simulierten Konzentrationen sind:
  - 200 g Uran innerhalb von 100 kg Bitumen. Dies entspricht einem Urananteil von 0,2% pro Masse und einer Rohdichte von  $1,076\text{g/cm}^3$  im Vergleich zu einer reinen Dichte von Bitumen von  $1,04\text{ g/cm}^3$ .
  - 100 g Uran innerhalb von 100kg Bitumen (0,1%,  $1,058\text{g/cm}^3$ )
  - 50 g Uran innerhalb von 100kg Bitumen (0,05%,  $1,049\text{g/cm}^3$ )
  - 25 g Uran innerhalb von 100 kg Bitumen (0,025%,  $1,044\text{ g/cm}^3$ )
  - 15 g Uran innerhalb von 100 kg Bitumen (0,015%,  $1,043\text{ g/cm}^3$ ).

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Auf	 <b>BUNDEGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG</b>
NAAN	NNNNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	23420000				MAK	RB	0001	00	

Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachtanlage Asse II mittels Myographie

Blatt:29

## 6 ERGEBNISSE

Die Ergebnisse der in Abschnitt 5 beschriebenen Simulationen werden hier mit vertiefenden Diskussionen vorgestellt.

### 6.1 ORIENTIERUNG

Zur Beurteilung des Potentials der Myographie für eine bestimmte Anwendung ist es wichtig, zunächst die kritischen Parameter für die optische Bildgebung zu untersuchen. Ein wichtiger Parameter in dieser Optimierung ist die Ausrichtung der Detektoren und der Abfallbehälter selbst. Lynkeos hat in Studien für Abfallverpackungsanwendungen für die britische Industrie [14] gezeigt, dass diese Optimierung der Ausrichtung von Detektoren und Abfallbehältern den Unterschied zwischen einem erfolgreichen und einem erfolglosen Myographie-Ergebnis ausmachen kann. Eine optimale Orientierung des Abfallbehälters ist in der Praxis jedoch nicht immer möglich.

Für die Charakterisierung von Abfallbehältern, die aus der Schachtanlage Asse II zu Tage gebracht werden, wird im Folgenden davon ausgegangen, dass die Wahl der Orientierung möglich ist. Um einen ersten Blick auf das Beispiel eines VBA Behälters zu werfen (ein wichtiger Schritt, um die Analyse auf diese spezifische Anwendung zuschneiden zu können) wurde eine erste Simulation mit einer VBA in horizontaler und vertikaler Ausrichtung durchgeführt. In Abschnitt 6.4, wird es wichtig sein, Detektoren in vertikaler Ausrichtung zu haben. Vorerst werden sich die Detektoren jedoch horizontal ausgerichtet über und unter den VBAs befinden. Ein Schema der simulierten VBA ist in Abb. 7 gezeigt. Diese besteht aus einem betongeschirmten VBA mit Betonfüllung und luftgefüllten Würfeln mit 10cm Kantenlänge (die einen Hohlraum darstellen), sowie Stahl und Uran Würfeln derselben Kantenlänge. Dies wurde in einer aufrechten Ausrichtung und in einer gedrehten, horizontalen Ausrichtung analysiert.

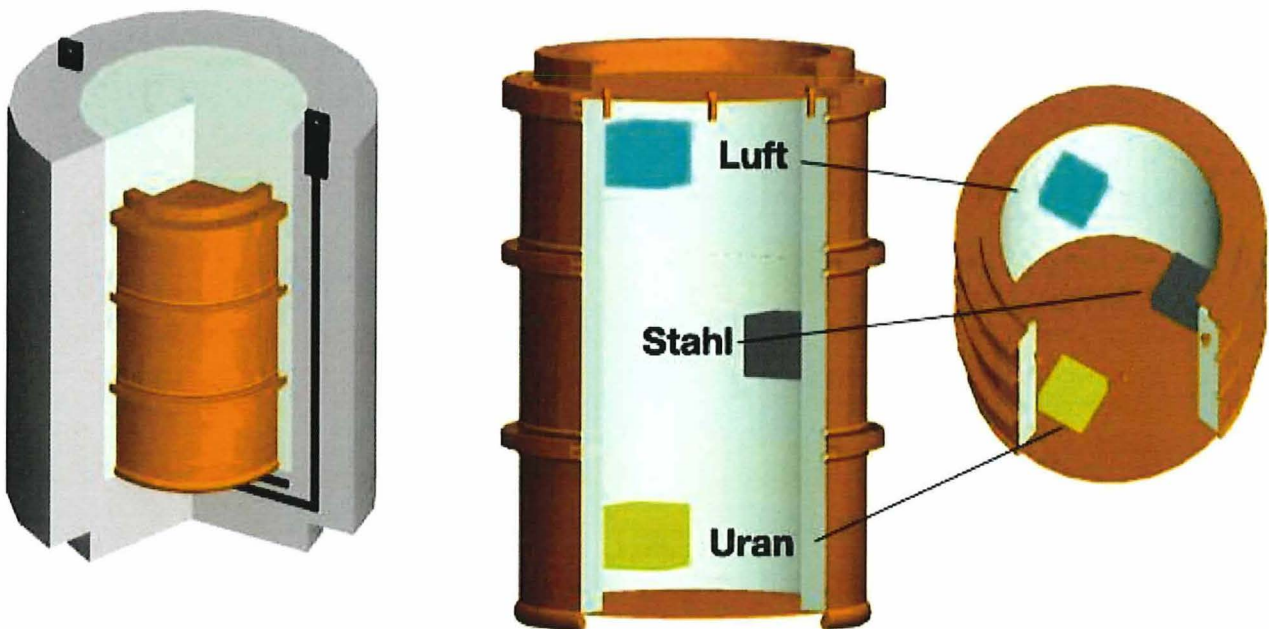


Abb. 7: Simulation einer betongeschirmten VBA mit Betonfüllung und 10cm Würfeln aus Luft, Stahl und Uran. Ein Schema dieser vertikalen VBA innerhalb des Detektors ist in Abb. 5 dargestellt.

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Auf		BGE BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG
NAAN	NNNNNNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	23420000				MAK	RB	0001	00		Blatt:30

Die Ergebnisse von 4 Wochen simulierter Daten zeigen die Abbildungen 8, 9 und 10.

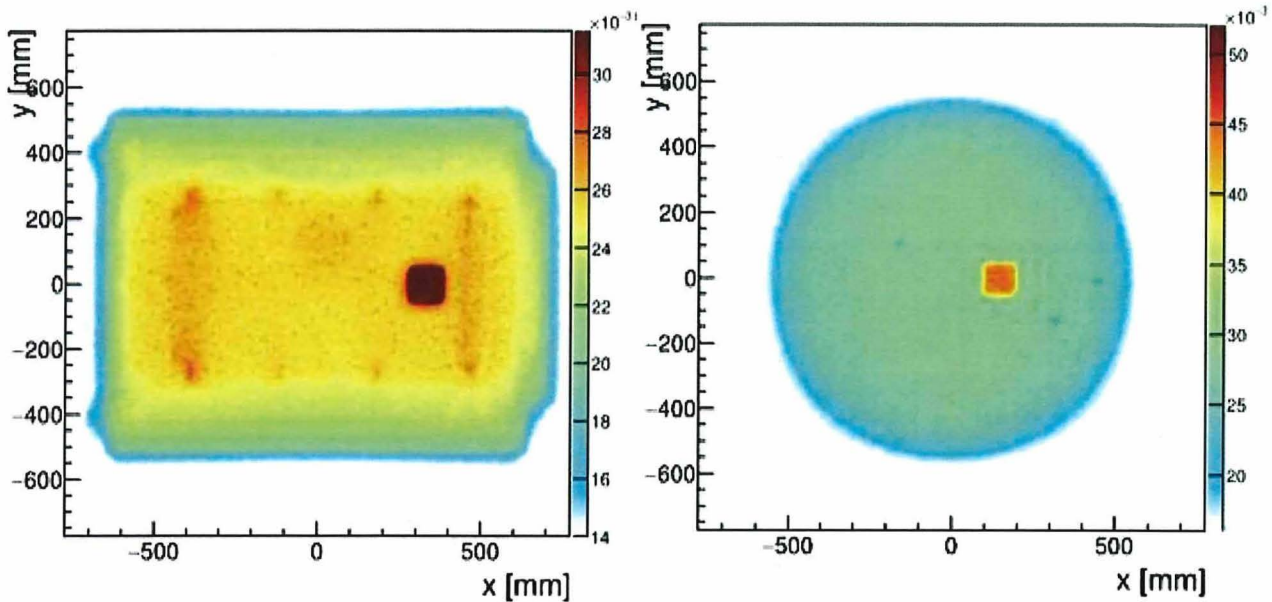



Abb. 8: Abgebildet sind 1cm dicke horizontale Scheiben durch die VBA im Bereich des 10cm Uranwürfels. Die horizontale (links) und vertikale (rechts) Ausrichtung der VBA werden beide gezeigt. In der horizontalen Ausrichtung ist aufgrund der schlechteren Auflösung in vertikaler Richtung auch ein leichter Schatten aus dem Stahlwürfel sichtbar. Die simulierten Daten entsprechen 4 Wochen realer Myonenexposition. Die Farbskala wurde auf jedem Bild geändert, um verschiedene Merkmale klarer zu identifizieren.

Abb. 8 zeigt das Abbild zweier 1 cm dicken horizontalen Scheiben oder Tomogramme, deren Schnitt durch die gleiche VBA, welches einmal horizontal und einmal vertikal ausgerichtet ist. Diese Schnitte und deren Abbildung wurden durch die Region geführt, die den 10 cm großen Uranwürfel enthält. Die ausgewählten zweidimensionalen Schnitte zeigen die wichtigsten Merkmale des Containers. In der horizontal ausgerichteten VBA ist die Abschirmbetonkonstruktion als einheitlicher Bereich mittlerer Dichte zu sehen. Der Stahlbehälter mit höherer Dichte im Inneren ist auch deutlich sichtbar, einschließlich der Rippen auf dessen Außenfläche. Im Inneren des Behälters befindet sich der hochdichte Uranwürfel an der richtigen Position. Er wurde auch mit den richtigen Abmessungen rekonstruiert, obwohl er an den Rändern aufgrund einer leicht gesättigten Farbskala verschwommen zu sehen ist. Diese Sättigung wurde gewählt, um die anderen hier genannten Merkmale am besten hervorzuheben. Im oberen Mittelbereich des Behälters ist ein Schatten des Stahlwürfels sichtbar. Der Stahlwürfel befindet sich in einer weiter oben gelegenen Scheibe des dreidimensionalen Bildes, aber seine Anwesenheit kann immer noch nachgewiesen werden. Dies liegt an der bereits beschriebenen schlechteren Bildauflösung in der primären Richtung der Myonenbewegung, in diesem Fall in vertikale Richtung.

Für die vertikale Ausrichtung wurde die Farbskala der Streudichte modifiziert, um sich auf die Uranidentifikation zu konzentrieren. Hier ist der Uranwürfel mit scharfen Kanten deutlich sichtbar. Die gleichmäßige Dichte des Betons wird im Behälter und im Abschirmbereich beobachtet. Der dünne Innenbehälter ist bei dieser Ausrichtung nicht sichtbar.

Diese erste Studie unterstreicht die Bedeutung der Orientierung, um verschiedene Merkmale zu erkennen, und die Notwendigkeit, analytische Techniken (einschließlich der Wahl der Farbskala) anwendungsspezifisch zu optimieren.

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Auf		 <b>BUNDEGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG</b>
NAAN	NNNNNNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	23420000				MAK	RB	0001	00		

Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachtanlage Asse II mittels Myographie

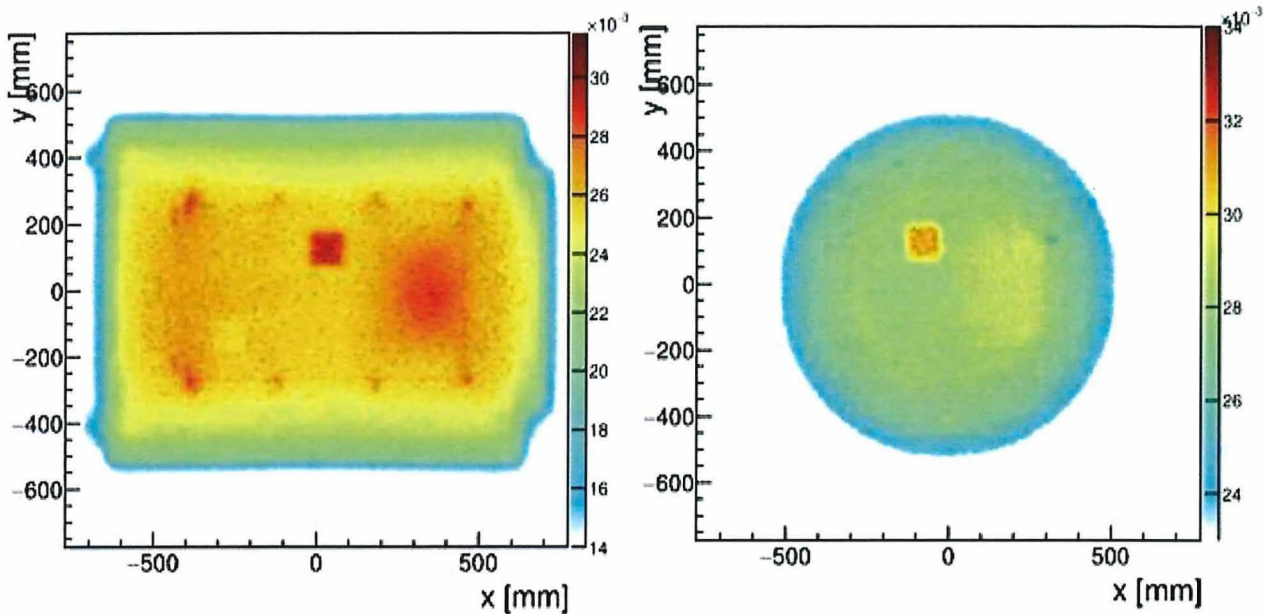


Abb. 9: Abgebildet sind 1cm dicke horizontale Scheiben durch den VBAim Bereich des 10cm Stahlwürfels. Die horizontale (links) und vertikale (rechts) Ausrichtung der VBA werden beide dargestellt. In der horizontalen Ausrichtung sind auch Schatten aus dem Uran- und Luftwürfels sichtbar. Die simulierten Daten entsprechen 4 Wochen realer Myonenexposition. Wie zuvor wurde die Farbskala auf jedem Bild modifiziert, um verschiedene Merkmale deutlicher zu identifizieren.

Wie bereits erwähnt, enthielt die Simulation auch Würfel aus Stahl und Luft. Diese werden im Folgenden untersucht.

In Abb. 9 werden zwei Tomogramme durch die VBA im Bereich des Stahlwürfels dargestellt. In der horizontalen Ausrichtung ist der Stahlwürfel in der oberen Mitte des Behälters deutlich zu sehen. Die gleichen VBA-Merkmale wie in Abb. 8 werden wieder beobachtet. In dieser Scheibe sind Schatten vom Uran (im Zentrum auf der rechten Seite des Behälters) und Luft (unten links) zu sehen. Die Farbskala wurde für die Identifizierung des Stahls optimiert, weshalb der Uranshatten gesättigt wurde. In der vertikalen Ausrichtung, mit einer optimierten Farbskala, ist der Umriss des Innenbehälters sichtbar.

Um den Luftwürfel zu beobachten, ist eine weitere Optimierung der Farbskala erforderlich. Nach den in Abb. 10 dargestellten Ergebnissen ist es jedoch immer noch möglich, ein eindeutiges Ergebnis zu erhalten. Dies unterstreicht erneut die Anforderungen an eine flexible Farbskala. Der Stahl und das Uran sind sehr prominent und gesättigt. In der vertikalen Ausrichtung wurde die Skala optimiert, um den inneren Behälterquerschnitt zu identifizieren. Hier ist das luftgefüllte Volumen nicht so klar zu unterscheiden.

Schließlich zeigt Abb. 11 die Ergebnisse eines genaueren Blicks auf die Stahlkonstruktionen der abgeschirmten VBA. Wie in den vorherigen Ergebnissen, zeigt die vertikale Ausrichtung den Stahlbehälter innerhalb der Abschirmung. In der horizontalen Ausrichtung sind nun mehr Details oben und unten im internen Behälter klar zu erkennen. Diese Resultate eignen sich gut für die Beurteilung des strukturellen Zustands, einschließlich der Korrosion, dieser Struktur. Untersuchungen wie diese stehen im Mittelpunkt anderer Lynkeos-Studien [14].

Diese erste Studie unterstreicht die Komplexität der Myographieanalyse und erfordert, dass ein ausgebildeter Analyst die Daten (basierend auf den Anforderungen der Endbenutzer) interpretiert.

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Auf	
NAAN	NNNNNNNNNNNNNN	NNAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	23420000				MAK	RB	0001	00	

**BUNDEGESELLSCHAFT  
FÜR ENDLAGERUNG**

Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachtanlage Asse II mittels Myographie

Blatt:32

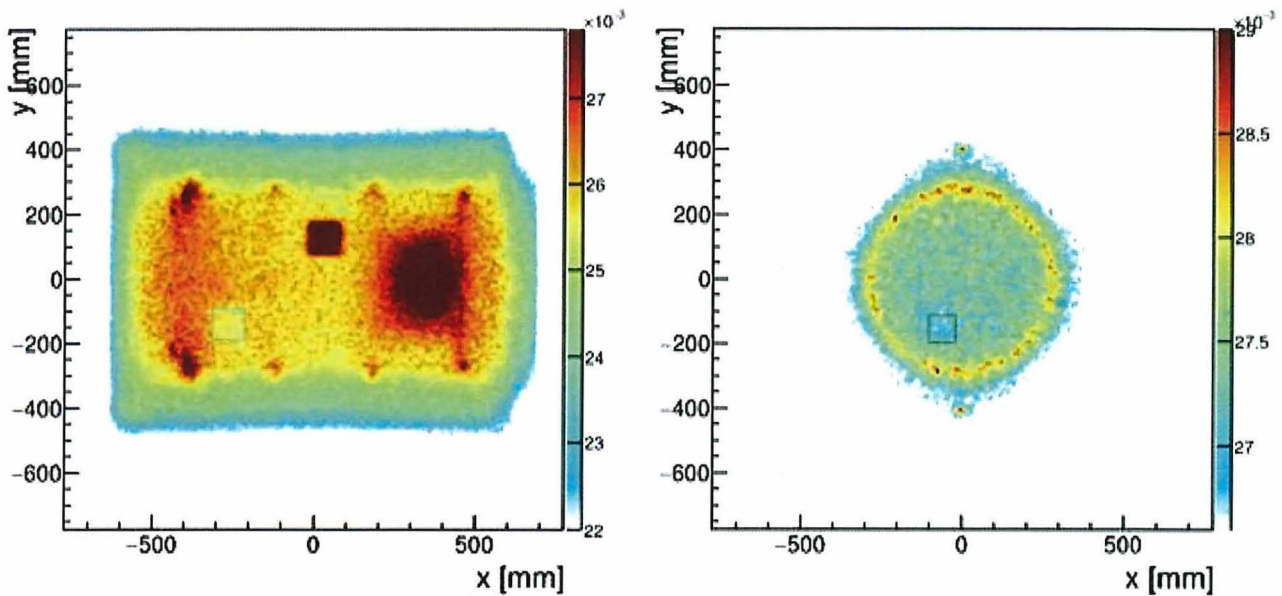


Abb. 10: Abgebildet sind 1cm dicke horizontale Scheiben durch den VBA im Bereich des 10cm Luftwürfels. Die horizontale (links) und vertikale (rechts) Ausrichtung des VBA werden beide dargestellt. In der horizontalen Ausrichtung stechen des Schatten Uran- und des Luftwürfels hervor. Die simulierten Daten entsprechen 4 Wochen realer Myonenexposition. Wie zuvor wurde die Farbskala auf jedem Bild modifiziert, um verschiedene Merkmale deutlicher zu identifizieren.

Die Entwicklung automatisierter Algorithmen, einschließlich solcher, die auf Machine Learning (Künstliche Intelligenz, KI) basieren, soll im Rahmen eines NDA-finanzierten PhD-Stipendiums entwickelt werden. Diese Arbeiten haben im Frühjahr 2022 begonnen.

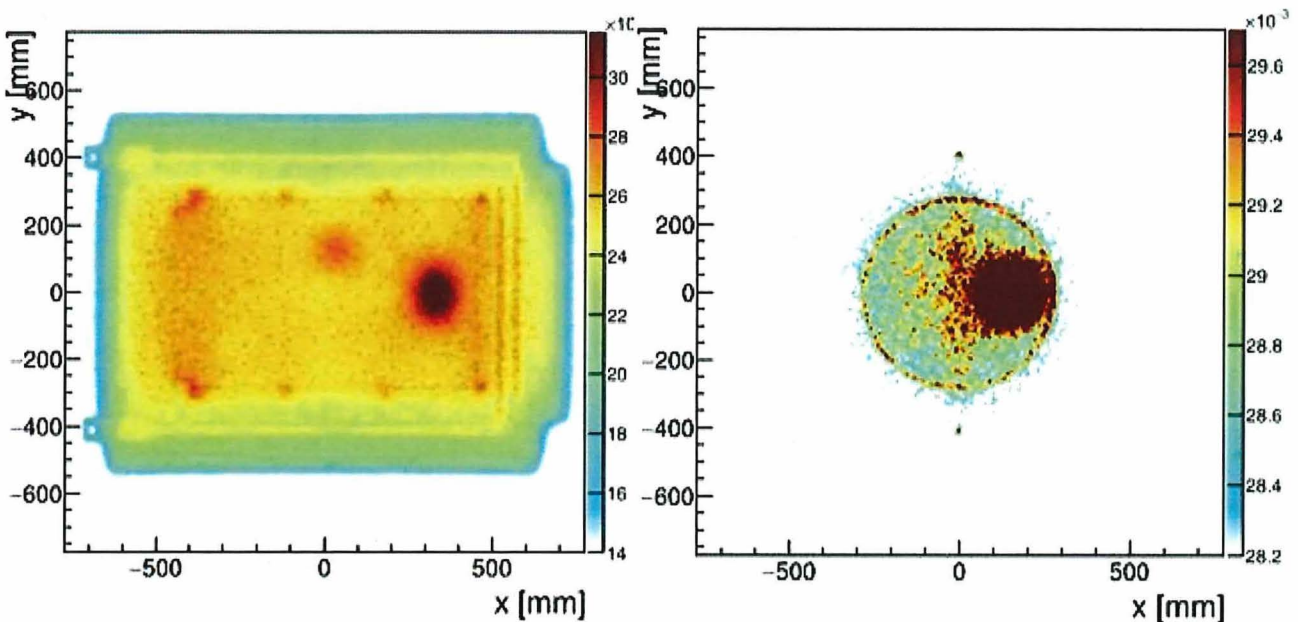


Abb. 11: Abgebildet sind 1cm dicke horizontale Scheiben durch die Mitte (Mitte) des VBA. Die horizontale (links) und vertikale (rechts) Ausrichtung des VBA werden beide dargestellt. Hier wurde die Farbskala modifiziert, um die Stahltragkonstruktionen zu identifizieren.



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Auf	
NAAN	NNNNNNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	23420000				MAK	RB	0001	00	

Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachtanlage Asse II mittels Myographie

Blatt:33

**BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG**

## 6.2 DICHTE

Das Hauptziel dieser Studie bestand darin, das Potenzial für die Verwendung der Myographie zur Identifikation der Zusammensetzung der VBA in Bezug auf Abschirm- und Füllmaterialien mit einem passiven Verfahren zu untersuchen. Vier Kombinationen sind in Abb. 12 dargestellt und umfassen drei betongeschirmte VBA, die entweder mit Beton, Bitumen oder Zement gefüllt sind, und eine mit Schwerbeton abgeschirmte VBA, die mit Beton gefüllt ist. Die simulierten Dichten dieser Materialien waren:

- Beton (Dichte = 2,40g/cm<sup>3</sup>)
- Zement (Dichte = 2,08g/cm<sup>3</sup>)
- Bitumen (Dichte = 1,04g/cm<sup>3</sup>)
- Schwerbeton (Dichte = 3,20g/cm<sup>3</sup>)

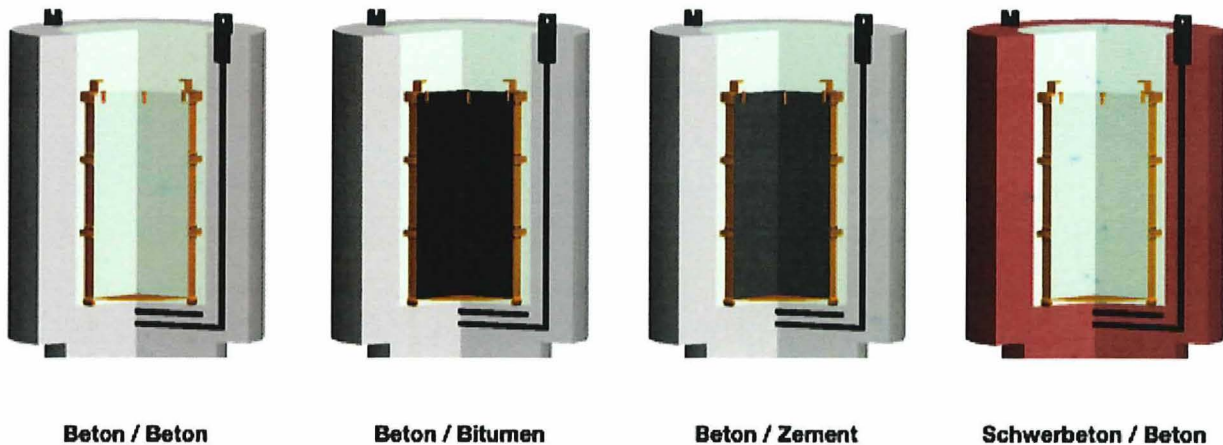


Abb. 12: Vier verschiedene VBA-Konfigurationen, die für die Machbarkeitsstudie simuliert wurden. Hellgrau und Grün stehen für Beton, Schwarz für Bitumen, Dunkelgrau für Zement und Rot für Schwerbeton.

Für diese Studie wurde die vertikale VBA-Orientierung als optimal ausgewählt. Jedes dieser Szenarien wurde äquivalent zu 2 Wochen Datennahme simuliert. Die Ergebnisse zeigt Abb. 13. Die Ergebnisse zeigen 40 cm dicke horizontale Scheiben durch die Mitte der VBA. In jeder Simulation sind die kreisförmigen Konturen der geschirmten VBA und des internen Behälters klar erkennbar. Die beiden Stahlträger-Konstruktionen sind auch in der Ober- und Unterseite der Bilder innerhalb der Abschirmbereiche als Kreise mit höherer Dichte sichtbar, allerdings nur in den mit Beton abgeschirmten Beispielen.

In allen Scheiben gibt es einen deutlichen Unterschied in der rekonstruierten Streudichte des Füll- und Abschirmmaterials. Es ist wichtig zu untersuchen, wie diese Streudichte mit der Materialdichte korreliert. Dies ist in Abb. 14 illustriert. Dieses Diagramm zeigt, dass es eine nichtlineare Beziehung zwischen beiden Variablen gibt. Es zeigt sich, dass Zement im Vergleich zu Beton einen größeren Streuwinkel erzeugt. Dies wird in Abb. 15 deutlich, wenn wir uns die Beziehung zwischen der Streudichte und der Strahlungslänge des Materials ansehen. Wenn die Myonenstreudichte mit dem Kehrwert der Strahlungslänge verglichen wird, beobachtet man eine lineare Beziehung. Diese Beziehung kann zur Kalibrierung verwendet werden. Sie stellt sicher, dass es möglich ist, die Materialien in einer realen Messung zu identifizieren.

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Auf		BGE BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG
NAAN	NNNNNNNNNNNNNN	NNAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	23420000				MAK	RB	0001	00		Blatt:34

Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachtanlage Asse II mittels Myographie

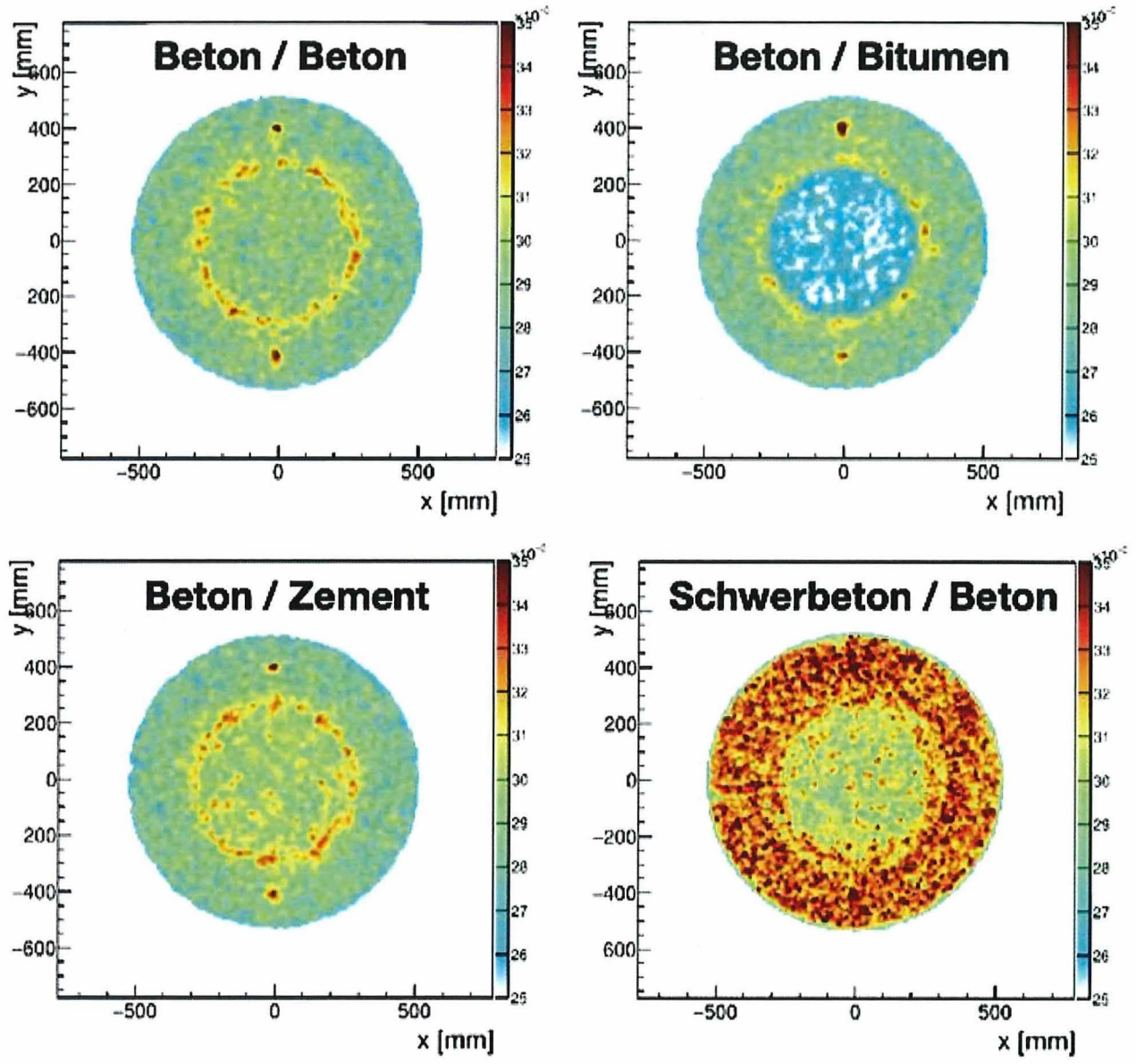


Abb. 13: Gezeigt sind 40cm dicke horizontale Scheiben durch jedes VBA-Szenario: Beton abgeschirmt und Beton gefüllt (oben links), Beton abgeschirmt und Bitumen gefüllt (oben rechts), Beton abgeschirmt und zementverfüllt (unten links) und Schwerbetonabschirmung und Beton gefüllt (unten rechts). Die gleiche Farbskala wurde verwendet, um den Vergleich zu erleichtern.

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Auf	
NAAN	NNNNNNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	23420000				MAK	RB	0001	00	

Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachtanlage Asse II mittels Myographie

Blatt:35

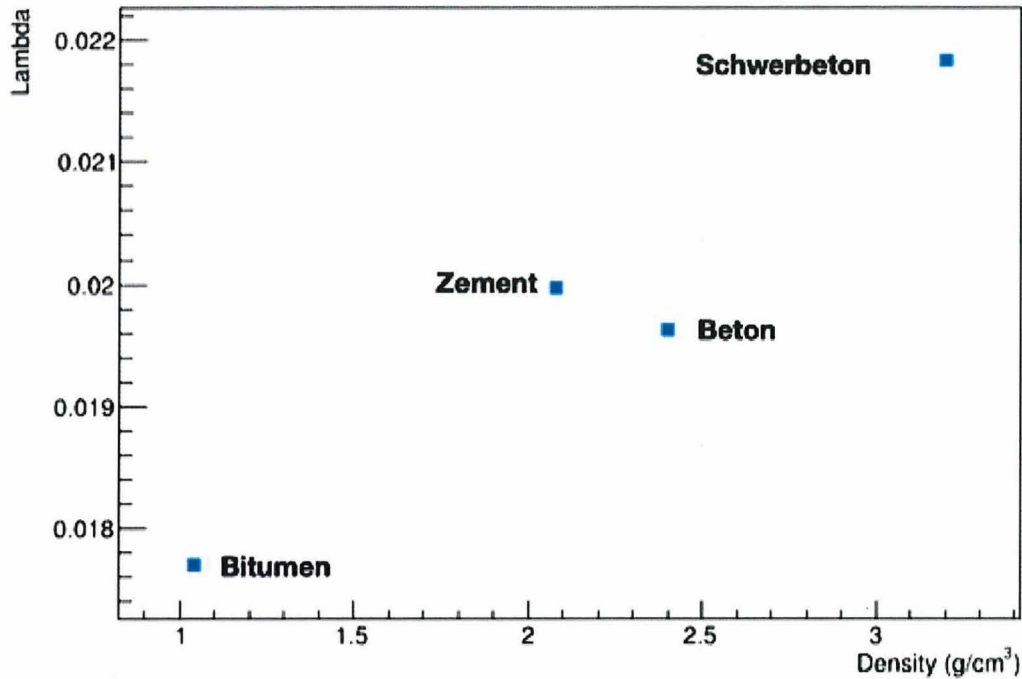


Abb. 14: Beziehungen zwischen rekonstruierter Streudichte und Materialdichte für die vier Materialien, die bei der Abschirmung und Füllung von VBA verwendet werden.

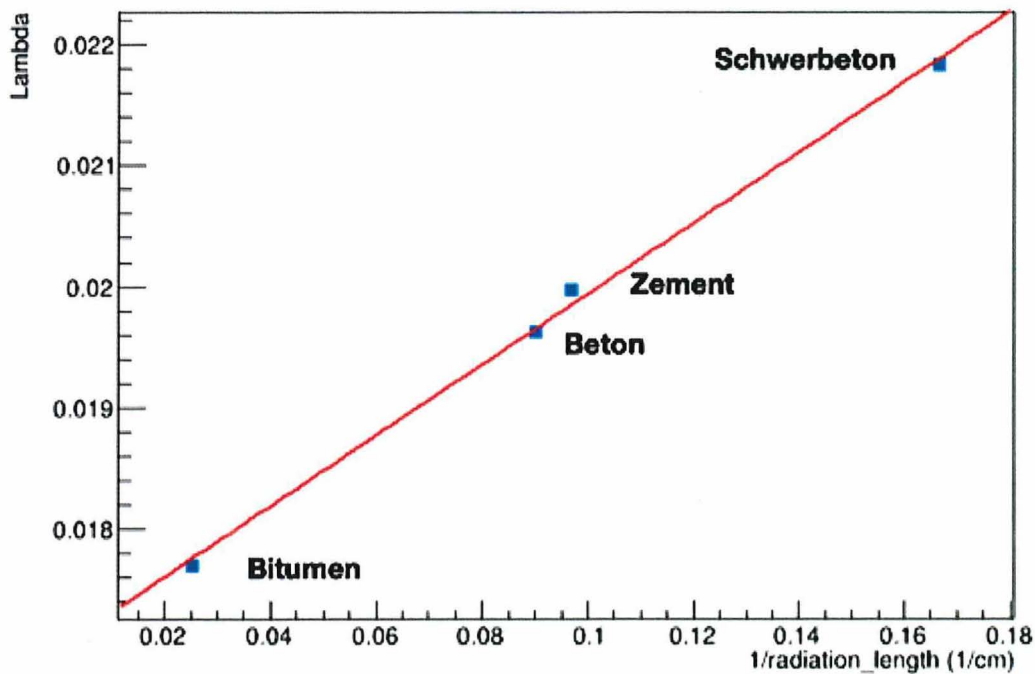


Abb. 15: Beziehung zwischen der rekonstruierten Myonenstreudichte und dem Kehrwert der Strahlungslänge des Materials. Es wird eine lineare Beziehung beobachtet.

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Auf	
NAAN	NNNNNNNNNNNNNN	NNAAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	23420000				MAK	RB	0001	00	

Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachtanlage Asse II mittels Myographie

Blatt:36

**BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG**

### 6.3 HOHLRAUM-ERKENNUNG

Um den Sicherheitsnachweis für die zukünftige Lagerung zu untermauern, ist es wichtig, mögliche Hohlräume in Abfällen, die aus der Schachtanlage Asse II geborgen werden, zu identifizieren. Es wurde bereits gezeigt, dass der Nachweis von Lufthohlräumen am besten innerhalb einer horizontal ausgerichteten VBA geführt werden kann. Diese Orientierung dient dazu, das Verhältnis von Hohlraum- zu Füllmaterialdicke zu maximieren. Für diese Studie wird eine horizontale Ausrichtung von VBA mit Betonabschirmung und Betonfüllung simuliert. Aufgrund der Platzbeschränkungen, innerhalb derer verschiedene Hohlräume platziert werden können, wurden zwei Simulationen entworfen. Diese sind in Abb. 16 dargestellt und enthalten:

- Konfiguration A: kubische Hohlräume mit Kantenlängen von 30 cm, 10 cm und 2 cm.
- Konfiguration B: kubische Hohlräume mit Kantenlängen von 20 cm, 5 cm und 1 cm.

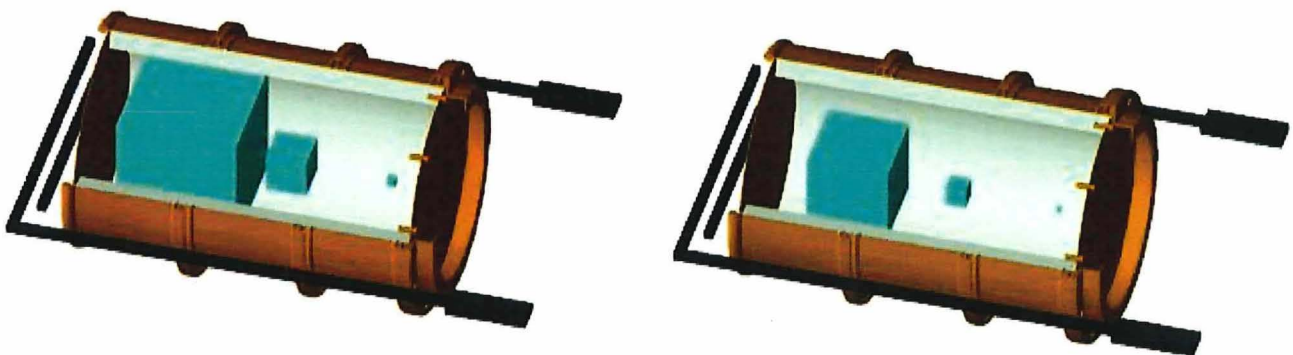



Abb. 16: Simulationen der Konfiguration A (links) mit kubischen Hohlräumen von 30 cm, 10 cm und 2 cm innerhalb der Betonfüllung und Konfiguration B (rechts) mit kubischen Hohlräumen von 20 cm, 5 cm und 1 cm innerhalb der Betonfüllung.

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Auf	 <b>BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG</b>
NAAN	NNNNNNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	23420000				MAK	RB	0001	00	

Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachtanlage Asse II mittels Myographie

Blatt:37

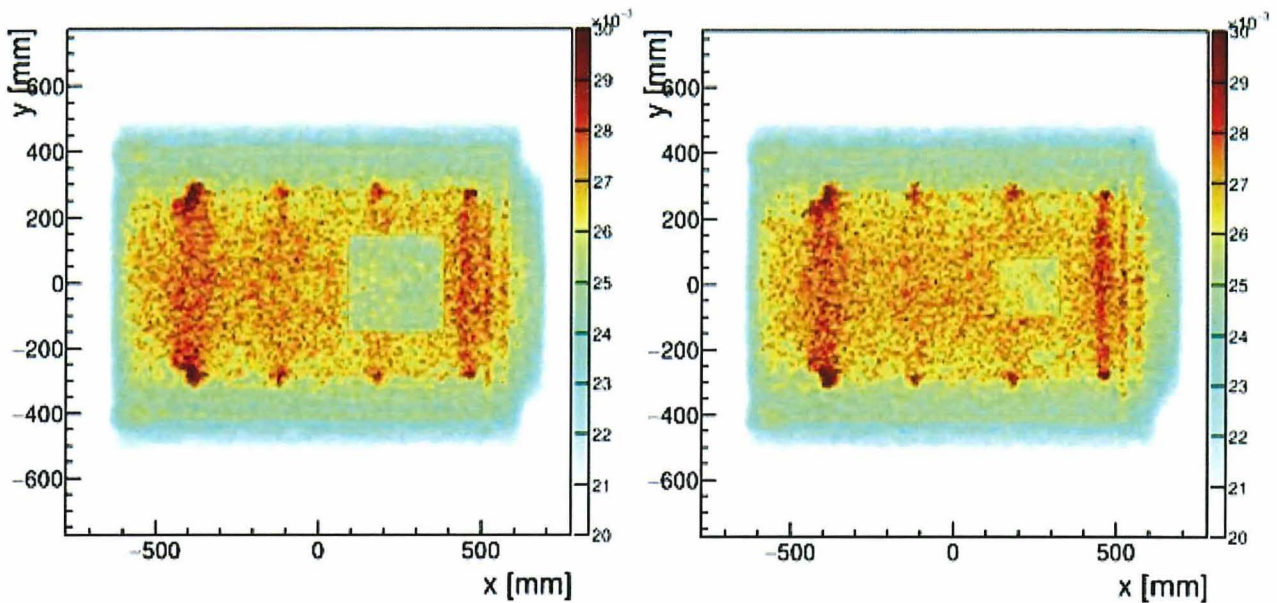


Abb. 17: Gezeigt sind 1 cm große horizontale Scheiben durch die Mitte der VBA für Konfiguration A (links) und Konfiguration B (rechts). Es wurde eine mit Beton gefüllte VBA verwendet. Das Bild erscheint um 180 Grad gedreht im Vergleich zu den Visualisationen in Abb. 16.

Die ersten Ergebnisse aus den Hohlräum-Simulationen werden in Abb. 17 dargestellt. Dies zeigt zwei horizontale Scheiben von 1 cm Dicke durch beide Konfigurationen. Für diese Studie wurde eine mit Beton gefüllte VBA simuliert. Die ersten Ergebnisse zeigen deutlich die zwei größten Hohlräume (30cm und 20cm Kantenlänge). Die vier kleineren Hohlräume sind aufgrund des geringeren Verhältnisses von Hohlraum zu Füllmaterial und wegen des bereits erwähnten vertikalen Verschmierungseffekts nicht leicht zu erkennen. Es gibt jedoch Hinweise darauf, dass der 10cm Hohlraum links vom 30cm Hohlraum vorhanden ist. In beiden ist die bekannte Stahlkonstruktion des Containers zu sehen.

Weiter unten werden wir weitere Analysen dieser Simulation vorstellen. Sie untersuchen das Potenzial zur Identifizierung der kleineren Hohlräume und zeigen die minimalen Zeiträume, die für eine positive Identifizierung erforderlich sind.

Hier verlagern wir jedoch den Fokus auf eine mit Bitumen gefüllte VBA. Dies stellt aufgrund des geringeren Dichteunterschieds zwischen Luft und Bitumen im Vergleich zu Beton ein schwierigeres Szenario dar. In Abb. 18 entsprechenden Schnitte durch Konfiguration A und Konfiguration B dargestellt. Hier wurden unterschiedliche Farbskalen und unterschiedliche Voxelgrößen gewählt, um die visuelle Erkennung eines Hohlräume zu optimieren. Die Hohlräume sind jedoch nicht deutlich sichtbar.

Um die Erkennung von Hohlräumen weiter zu erforschen, wurde die Simulation mit einer Dauer von 1 Tag bis 32 Wochen durchgeführt. Sowohl die betongefüllten als auch die mit Bitumen gefüllten Aufbauten wurden analysiert. Die Ergebnisse daraus sind in den Abbildungen 19, 20 und 21 dargestellt. Diese konzentrieren sich immer noch auf die horizontale Ausrichtung der VBA, zeigen aber nun die um 90 Grad gedrehte Simulation.

In Abb. 19 ist die mit Beton gefüllte Konfiguration A für verschiedene Intervalle von 1 Tag bis 16 Wochen simulierter Myonendaten dargestellt. Nach 2-4 Tagen wird der 30cm große Hohlraum mit zunehmender Deutlichkeit im Laufe der Zeit sichtbar. Nach 1 Woche besteht hinreichende Evidenz, dass dieser Hohlraum existiert. Die 10cm und 2cm Hohlräume können jedoch nicht aufgelöst

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Auf		BGE BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG
NAAN	NNNNNNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	23420000				MAK	RB	0001	00		Blatt:38

Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachanlage Asse II mittels Myographie

Blatt:38

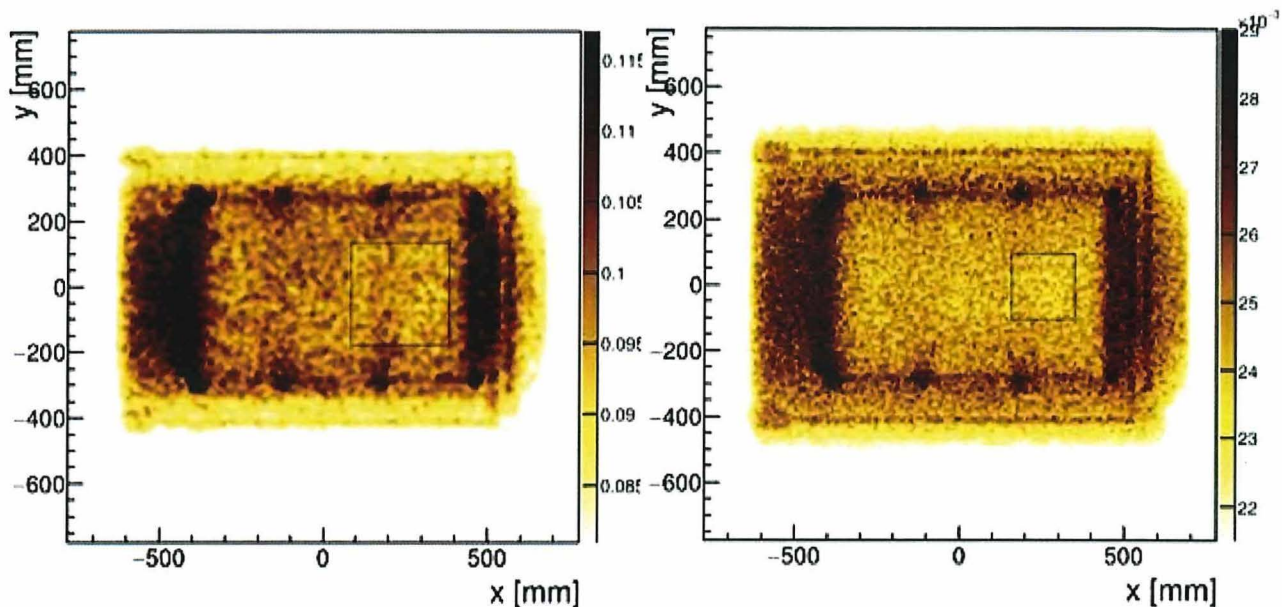



Abb. 18: Gezeigt sind 1 cm große horizontale Scheiben durch die Mitte des VBA für Konfiguration A (links) und Konfiguration B (rechts). Es wurde ein mit Bitumen gefülltes VBA verwendet. Das Bild erscheint um 180 Grad gedreht im Vergleich zu den Simulationen in Abb. 16. Eine andere Farbskala wurde untersucht, um die Erkennungsfähigkeit zu verbessern.

werden. In Konfiguration B, dargestellt in Abb. 20, zeigt sich der größte (20cm) Hohlraum nach etwa 1 Woche Myonenexposition. Auch hier werden die kleineren beiden Hohlräume (5 cm und 1 cm) auch nach 32 Wochen Myonenexposition nicht identifiziert.

Aus den gezeigten Ergebnissen geht hervor, dass die derzeitigen Myographie-Algorithmen nicht für die Erkennung kleiner Hohlräume in Beton geeignet sind und dass es bei Füllmaterialien mit geringerer Dichte wie Bitumen eine noch größere Herausforderung ist. Für diese Analyse sind daher neue Algorithmen erforderlich. Lynkeos hat für diese spezielle Anwendung ein neues Bildgebungsverfahren entwickelt.

Im Vergleich zu den zuvor gezeigten Ergebnissen zeigt der neue Algorithmus eine deutliche Verbesserung. Die neue Bildgebungsanalyse für den Nachweis von Hohlräumen wurde nur für diese Studie verwendet. Die Details der neuen Technik können derzeit nicht näher ausgeführt werden. Sie funktioniert jedoch am besten mit einer vertikalen VBA-Ausrichtung. Um die Verbesserung der Fähigkeit zur Hohlraumerkennung zu demonstrieren, wurden neue Simulationen mit einer vertikal ausgerichteten VBA mit Betonabschirmung und Beton- und Bitumenfüllmaterialien mit den gleichen Hohlraumgrößen wie zuvor erstellt. Die Ergebnisse einer anfänglichen Bildgebung von 18 Tagen für beide Simulationen sind in Abb. 22 gezeigt. Diese zweidimensionalen Scheiben zeigen die erfolgreiche Identifizierung von Hohlräumen bis zu einer Größe von 5 cm für die Betonfüllung. Hohlräume mit einer Größe von 10 cm sind in Bitumen deutlich sichtbar. Im Fall von Bitumen gibt es Hinweise darauf, dass ein 5 cm großer Hohlraum bei längerer Messzeit sicher identifiziert wird. Derzeit sind Hohlräume von weniger als 5 cm innerhalb einer abgeschirmten VBA immer noch eine Herausforderung an diese Technologie.

Abb. 23 fasst diese Studie zusammen. Sie zeigt die Beziehung zwischen der Erkennungszeit und der Hohlraumgröße. Zur Identifikation eines Hohlräumens wird ein Vertrauensintervall von 2 Standardabweichungen in der gemessenen Dichte des betrachteten Volumens im Vergleich mit der durchschnittlichen Dichte des Füllmaterials angewendet. Dies unterstreicht das Potenzial, große Hohlräume in Beton in wenigen Tagen und kleinere Hohlräume (10 cm oder weniger) in Zeiträumen

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Auf		 <b>BUNDEGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG</b>
NAAN	NNNNNNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	23420000				MAK	RB	0001	00		
Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachtanlage Asse II mittels Myographie										Blatt:39

von 1-2 Wochen zu identifizieren. Für Bitumen dauert es typischerweise doppelt so lange wie in Beton, um Hohlräume zu beobachten. Hohlräume von weniger als 5 cm Größe erfordern Zeitskalen von 3 Wochen oder mehr für den Nachweis innerhalb von Beton, wobei nicht erwiesen ist, ob Hohlräume von 2 cm oder weniger überhaupt zu identifizieren sind.

Die Schlussfolgerung, die aus dieser Studie gezogen werden kann ist, dass der Einsatz der Myographie auf jede spezifische Anwendung optimiert werden muss, um die gewünschten Ergebnisse zu erzielen. Oft erfordern neue Anwendungen die Entwicklung neuer Algorithmen und Analysen.

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Auf
NAAN	NNNNNNNNNNNNNN	NNAAANN	AAANNA	AAANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	23420000				MAK	RB	0001	00

Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachtanlage Asse II mittels Myographie

BGE BUNDEGESSELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG

Blatt:40

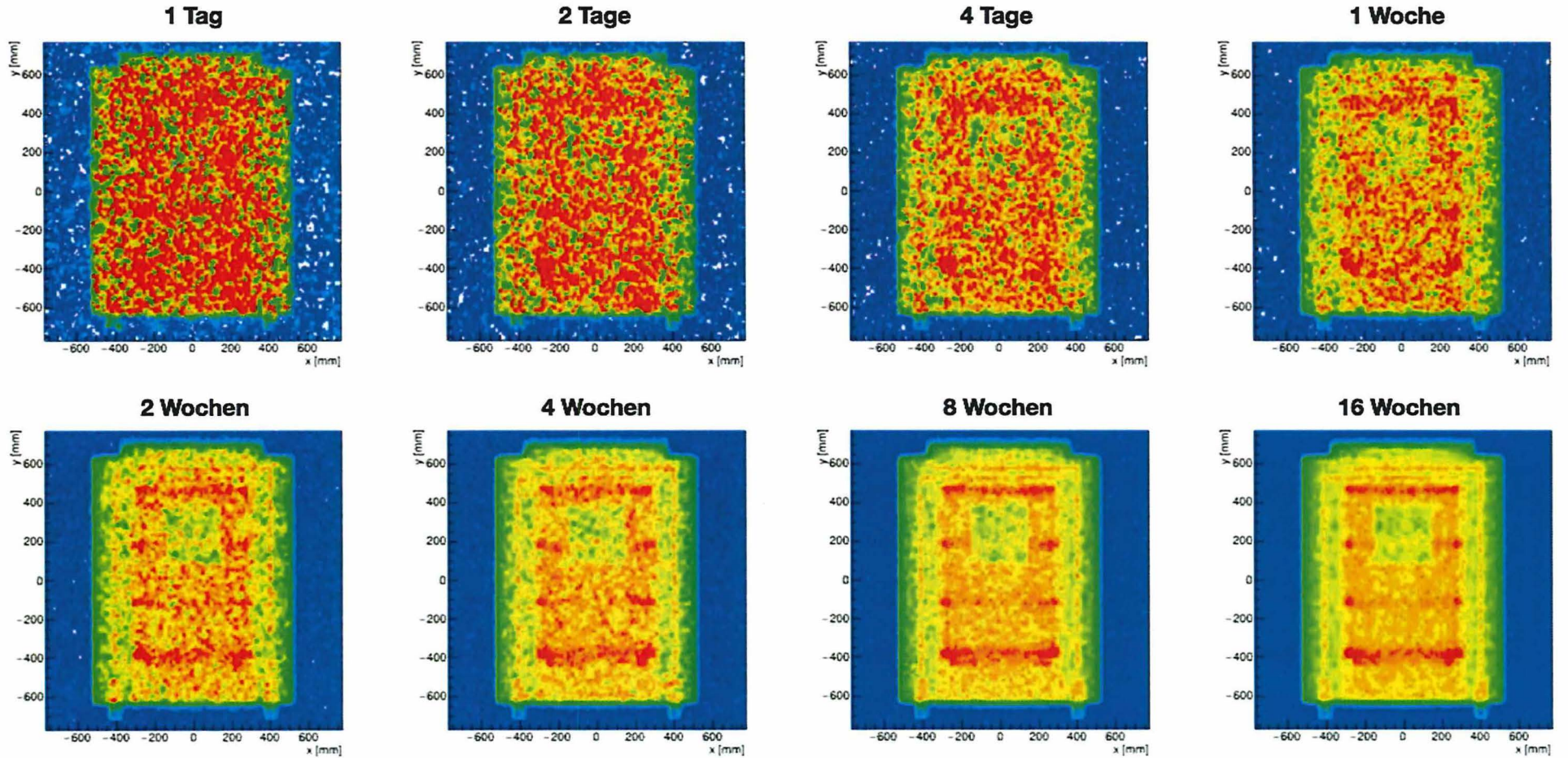


Abb. 19: Abgebildet sind 1cm horizontale Scheiben durch eine betongeschirmte VBA mit Betonfüllung, die basierend auf Konfiguration A gefüllt ist. Von links nach rechts sind die Laufzeiten 1 Tag, 2 Tage, 4 Tage, 1 Woche (alle obere Reihe), 2 Wochen, 4 Wochen, 8 Wochen und 16 Wochen (alle untere Reihe). Das Vorhandensein des 30 cm großen Hohlrums (der sich in der Nähe der Oberseite des Behälters befindet) und die Stützstrukturen werden zunehmend deutlicher.



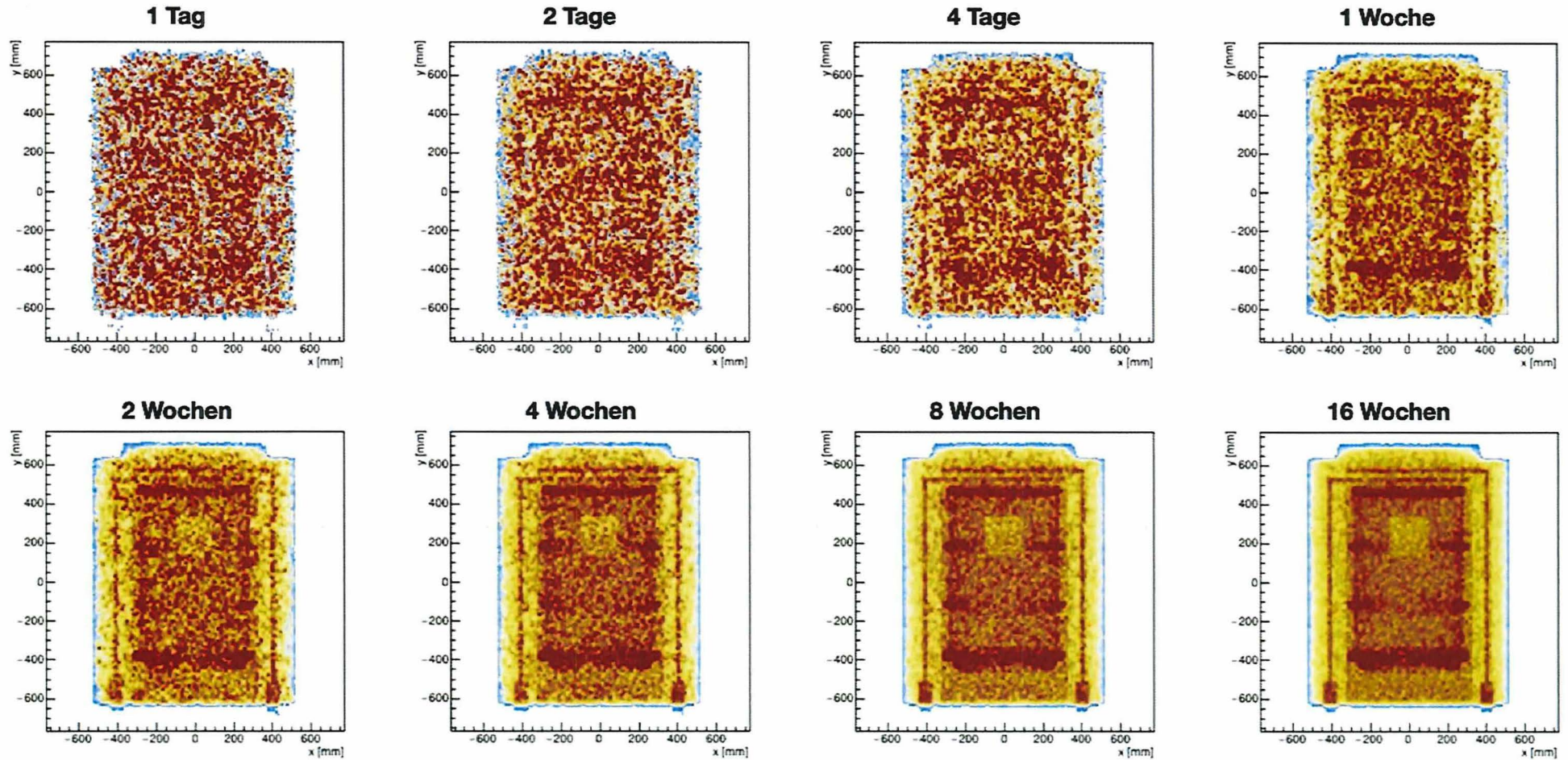


Abb. 20: Abgebildet sind 1cm horizontale Scheiben durch eine betongeschirmte VBA mit Betonfüllung, die basierend auf Konfiguration B gefüllt ist. Von links nach rechts sind die Laufzeiten 2 Tage, 4 Tage, 1 Woche, 2 Wochen (alle obere Reihe), 4 Wochen, 8 Wochen, 16 Wochen und 32 Wochen (alle untere Reihe). Das Vorhandensein des 20 cm großen Hohlraums (der sich in der Nähe der Oberseite des Behälters befindet) und die Stützstrukturen werden zunehmend deutlicher.

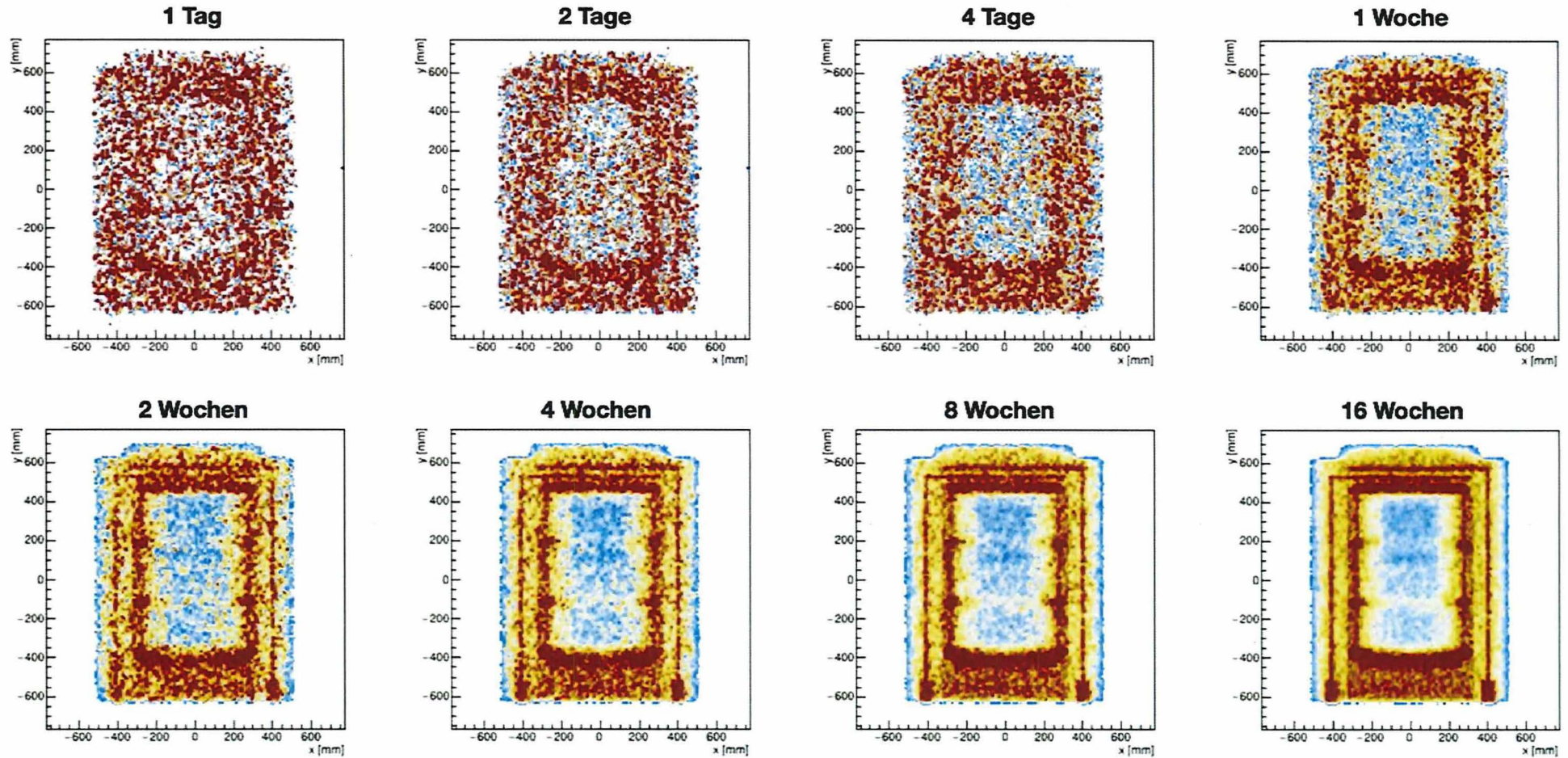


Abb. 21: Abgebildet sind 1 cm horizontale Scheiben durch eine betongeschirmte VBA mit Bitumenfüllung, die basierend auf Konfiguration A gefüllt ist. Von links nach rechts sind die Laufzeiten 2 Tage, 4 Tage, 1 Woche, 2 Wochen (alle obere Reihe), 4 Wochen, 8 Wochen, 16 Wochen und 32 Wochen (alle untere Reihe). Das Vorhandensein des 30 cm hohlen Hohlraums (der sich in der Nähe der Oberseite des Behälters befindet) und die Stützstrukturen werden nur in den größeren Zeitskalen deutlich erkennbar.

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Auf
NAAN	NNNNNNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	23420000				MAK	RB	0001	00

Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachtanlage Asse II mittels Myographie

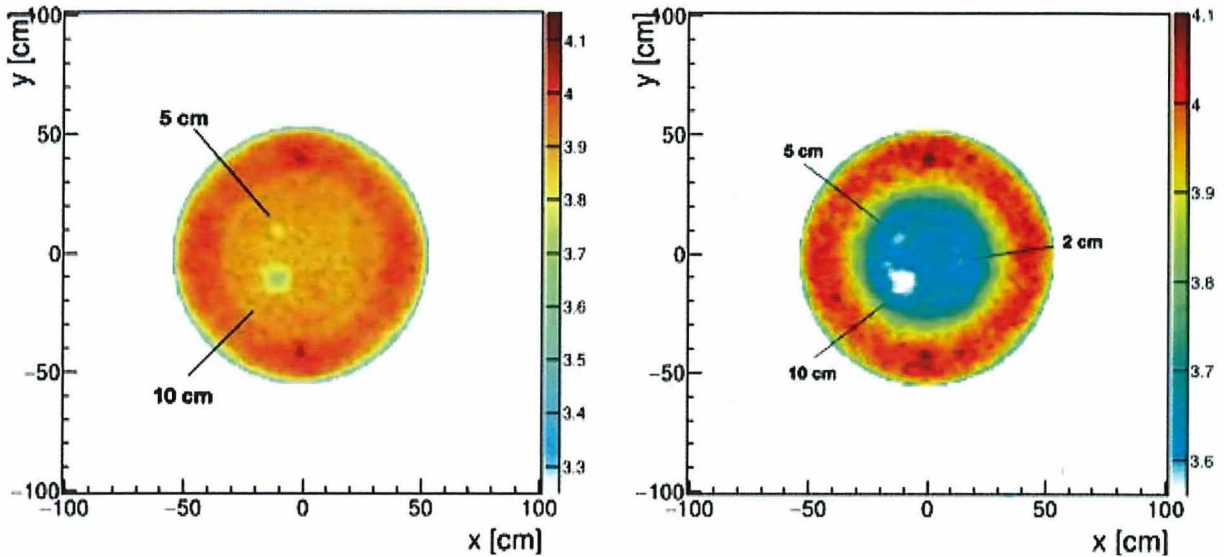


Abb. 22: Abgebildet sind 1 cm horizontale Scheiben durch eine betongeschirmte VBA mit 10 cm, 5 cm und 2 cm Hohlräumen, die nach 18 Tagen Myonenexposition in betonierter Füllung (links) und Bitumenfüllung (rechts) platziert sind. Die Farbskalen wurden für die Erkennung von Hohlräumen in jedem Material optimiert.

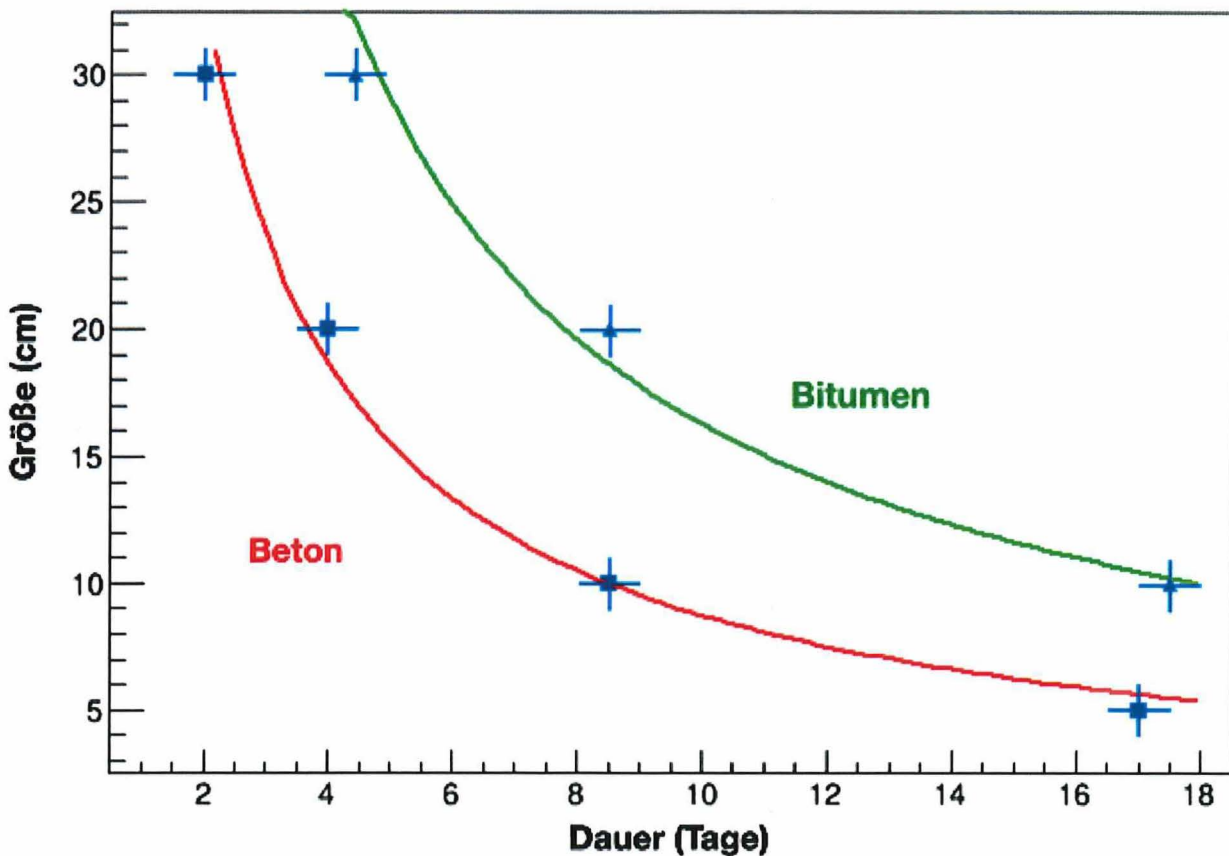



Abb. 23: Beziehungen zwischen Hohlraumgröße und Abbildungsdauer in Beton- (rote Linie) und Bitumen (grüne Linie) als Füllmaterial.

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Auf		 <b>BUNDEGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG</b>
NAAN	NNNNNNNNNNNN	NNAANN	AANNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	23420000				MAK	RB	0001	00		

Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachtanlage Asse II mittels Myographie	Blatt:44
---	----------

## 6.4 PHASENGRENZEN

Die nächste Studie betrifft die Identifizierung von Phasengrenzen innerhalb der VBA. Wie bereits erwähnt, macht es die Verschmierung in der vertikalen Hauptrichtung der Myonentrajektorien durch die Detektormodulpaare unwahrscheinlich, dass Detektoren, die über und unter einer VBA platziert sind, in der Lage sind, verschiedene Materialschichten zu identifizieren. Die relevanten Materialien in diesem Falle sind Beton, Abfall und Luft. In Abb. 24 ist das Detektorsystem gezeigt, welches für eine ähnliche Verwendung in der britischen Industrie vorgeschlagen wurde. Vertikale Module, wie sie für diesen 4-seitigen Detektor gezeigt sind, werden für diese Studie verwendet.



Abb. 24: Konzeption eines vierseitigen MIS für die Zustandsüberwachung und Inspektion von 3m<sup>3</sup> Behältern für die UK Nuclear Industry. Diese Ausrichtung der Detektormodule ermöglicht eine große Flexibilität bei den erforderlichen Messungen, einschließlich der Identifikation der Phasengrenzen.

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Auf	
NAAN	NNNNNNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	23420000				MAK	RB	0001	00	

Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachanlage Asse II mittels Myographie

Blatt:45

**BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG**

In [14] sind die Ergebnisse der vorangegangenen Lynkeos-Studie zur Phasengrenzerkennung dokumentiert.

Hier wurde die erstmals in Abb. 5 gezeigte Konfiguration mit einer vertikalen VBA mit Betonabschirmung und verschiedenen Ebenen von Beton, Wasser und Luft als Füllmaterialien erstellt. Vertikale Detektoren mit Fasern mit einem Durchmesser von 2 mm wurden in Abständen von 1 m und 1,6 m links und rechts des VBA simuliert. Diese Detektoren haben aktive Messbereiche von  $(2\text{m})^2$  bzw.  $(2,5\text{m})^2$  Volumen. Ein Beispielschema des VBA-Containers mit unterschiedlichen Füllvolumina ist in Abb. 25 gezeigt. Zur besseren Übersicht wurden die Detektoren nicht dargestellt.

Die Ergebnisse dieser Analyse basieren auf einer anderen Analysetechnik als zuvor beschrieben. Diese ist komplex und ist am besten unter Bezugnahme auf ein Beispielergebnis erklärt. Dieses Beispiel ist in Abb. 26 dargestellt und verwendet zunächst 16 Wochen Myonendaten.

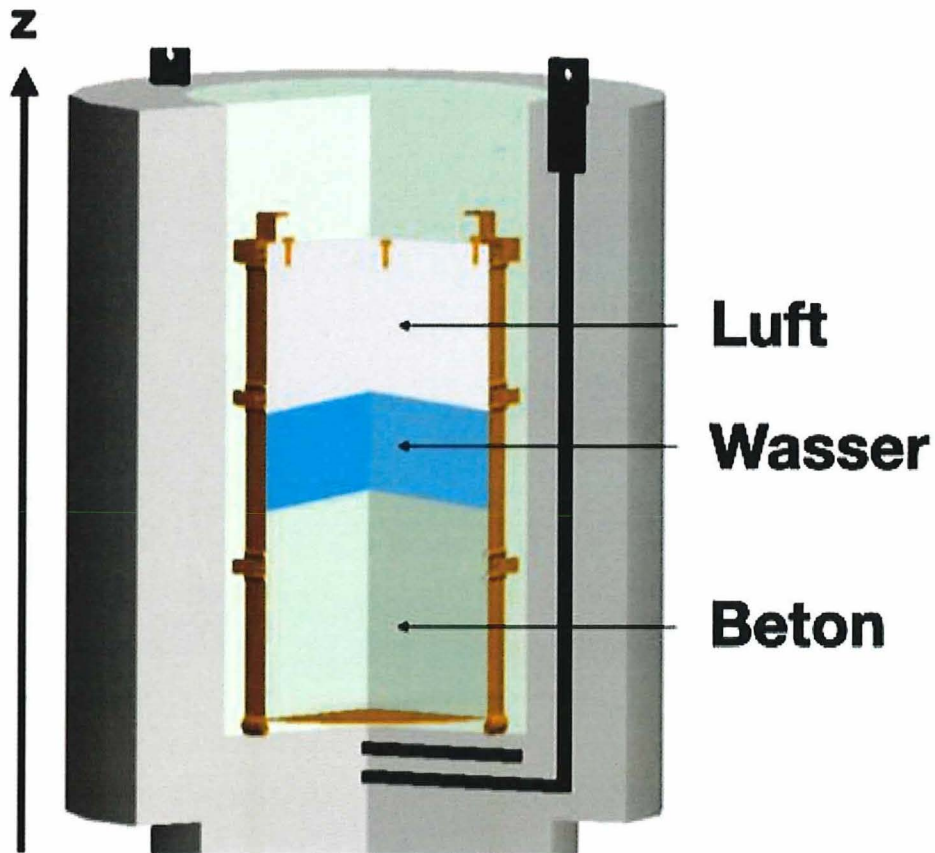



Abb. 25: Ein Beispiel für ein VBA-Setup mit Betonabschirmmaterial und Schichten aus Beton, Wasser und Luft. Zur bessern Orientierung wird die vertikale Achse (z-Achse) angezeigt.

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Auf		 <b>BUNDEGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG</b>
NAAN	NNNNNNNNNNNNNN	NNAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	23420000				MAK	RB	0001	00		

Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachanlage Asse II mittels Myographie

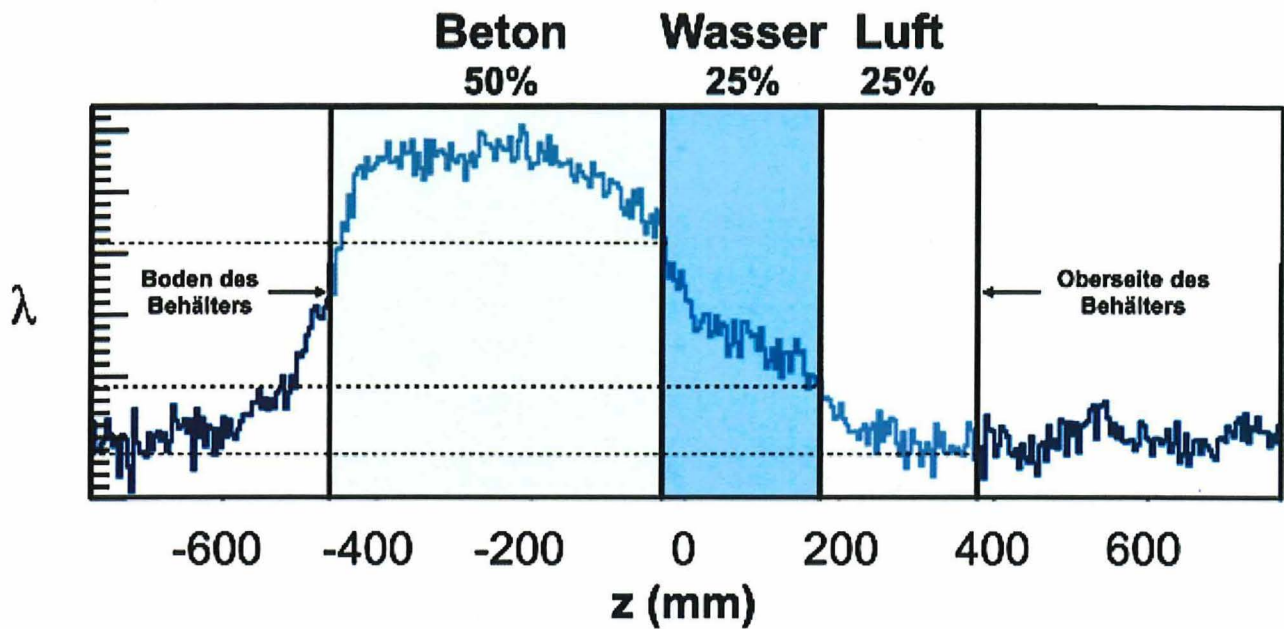


Abb. 26: Durchschnittlich rekonstruierte Streudichte dargestellt als Funktion der Tiefe in Bezug auf die vertikale Achse, z. Die Abmessungen des Behälters und die Füllbeton-, Wasser- und Luftstände werden gezeigt.

Um einen Füllstand, insbesondere mehrere Füllstände, zu ermitteln, ist ein Detektor-Aufbau mit seitlichen Detektoren die optimale Wahl. Dies ist erforderlich, um sicherzustellen, dass sich der Effekt der Verschmierung nicht in der Ebene befindet, die die vertikalen Füllstände enthält. Für diese Simulation wurden zwei Paare von seitlich angebrachten Detektoren verwendet.

Die verwendeten Myonendaten sollten auf Myonen beschränkt werden, die in nahezu horizontalen Winkeln einfallen, zum Beispiel in einem Winkel von größer als 85° zur Vertikalen. Damit soll sichergestellt werden, dass die meisten Myonen nur eine einzige Materialschicht passieren. Andernfalls wird es schwierig, die Grenzflächen zwischen Abfall-, Wasser- und Luftmengen zu identifizieren, da Myonen mit niedrigerem Winkel (z. B. zwischen 45° und 75°) verschmieren und die Grenzen verwischen. Dies stellt eine besondere Herausforderung dar, da der Myonenfluss bei niedrigen Winkeln im Vergleich zu vertikal einfallenden Myonen stark reduziert ist (siehe Abb. 4). Die Herausforderung besteht daher darin, zuverlässige Füllstandsdaten aus einem begrenzten Datensatz zu extrahieren. Diese Studie konzentriert sich auf die Identifizierung der Luft-, Wasser- und Beton-Phasengrenzen und die Feststellung der Unsicherheit bei diesen Messungen. Zunächst betrachten wir Myonen mit Winkeln zwischen 0° und 15° zur Horizontalen.


Zuerst werden Myonen durch die Simulation verfolgt und eine Standard-3D-Streudichtekarte erstellt. Für diese Anwendung zeigen vertikale Schnitte nahezu horizontale Bereiche mit gleichmäßiger Streudichte. Konzentrieren wir uns nun auf das Ergebnis in Abb. 26. Hier sehen wir die durchschnittliche Streudichte als Funktion der Position auf der vertikalen z-Achse. Die Bereiche gefüllt mit Beton, Wasser und Luft (mit einem Füllstand von 50%, 25% bzw. 25%) werden identifiziert. Dies zeigt einen relativ einheitlichen Bereich des Materials mit der höchsten Dichte, Beton, der zu einem Plateau aufsteigt und von dort fällt. Die Wasser- und Luftregionen mit geringerer Dichte zeigen eine stetige Abnahme der Streudichte.

Es wird darauf hingewiesen, dass die Farbbänder in der Abbildung die simulierte Konfiguration darstellen. Eine Analyse der rekonstruierten Daten ergibt die gleichen Positionen im Rahmen der experimentellen Auflösung. Dies liegt an der 15° Breite der Winkelverteilung der Myonen, die die

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Auf	
NAAN	NNNNNNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	23420000				MAK	RB	0001	00	

Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachanlage Asse II mittels Myographie

Blatt:47



**BUNDEGESELLSCHAFT  
FÜR ENDLAGERUNG**

Übergänge verwischen. Diese Streuung weiter zu reduzieren, erfordert deutliche längere und daher nicht praktikable Messdauern. Um die Schnittstellenebene zu bestimmen, muss eine detaillierte Analyse der Form dieser Bänder durchgeführt werden. Aus diesen Daten können die Unterschiede im Schlamm- und Wasserstand durch eine Analyse der Fallkante **der  $\lambda$ -Steigung** bestimmt werden. Da die Breite des Behälters ein bekannter Parameter ist, ist es möglich, die relative Dichte des Betons durch Vergleich der durchschnittlichen  $\lambda$ -Werte zu bestimmen. Sobald die Betondichte bekannt ist (siehe Abbildungen 14 und 15), können wir daraus die Beton-Füllstand im Behälter bestimmen, indem wir die Position der fallenden Kante der Kurve betrachten. Bei größerer Material-Füllstand bewegt sich die abfallende Kurve in Richtung höherer Z-Werte. Die Tiefe entspricht in etwa der FWHM des Lambda-Maximums. Für Wasser, mit einer Dichte sehr nahe bei  $1 \text{ g / cm}^3$ , ist das durchschnittliche Lambda für verschiedene Proben gleich, was bedeutet, dass das Plateau die gleiche Höhe hat. Bei einer relativ großen Wassertiefe wird es ein Plateau auf der rechten Seite der Lambda-Kurve geben. Wie bisher kann die durch das Wasser verursachte Fallkante der Kurve genutzt werden, um die Grenzfläche zwischen Wasser und Luft zu bestimmen. Mit mehr Wasser bewegt sich diese fallende Kante in Richtung höherer Z. Mit weniger Wasser wird es kein offensichtliches Plateau geben; Die fallende Kante der Betonkurve wird jedoch verzerrt, und durch Betrachtung des Grades der Verzerrung kann die Wassertiefe bestimmt werden. Mit diesen Analysemethoden werden die Grenzflächenebenen auf 1 cm genau identifiziert.

Die vollständigen Ergebnisse dieser Studie sind nun in den Abbildungen 27, 28 und 29 für drei verschiedene Winkelbereiche dargestellt. Diese sind: keine Einschränkungen, nur Winkel zwischen  $0^\circ$  und  $22^\circ$  zur Horizontalen bzw. nur Winkel zwischen  $0^\circ$  und  $15^\circ$ . Zusammenfassend sind die verschiedenen Kombinationen von Beton-, Wasser- und Luftfüllständen:

- 90% Beton, 10% Wasser und keine Luft
- 80% Beton, 20% Wasser und keine Luft
- 80% Beton, kein Wasser und 20% Luft
- 50% Beton, 25% Wasser und 25% Luft
- 40% Beton, 30% Wasser und 30% Luft.

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Auf		BGE BUNDEGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG
NAAN	NNNNNNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	23420000				MAK	RB	0001	00		Blatt:48

Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachtanlage Asse II mittels Myographie

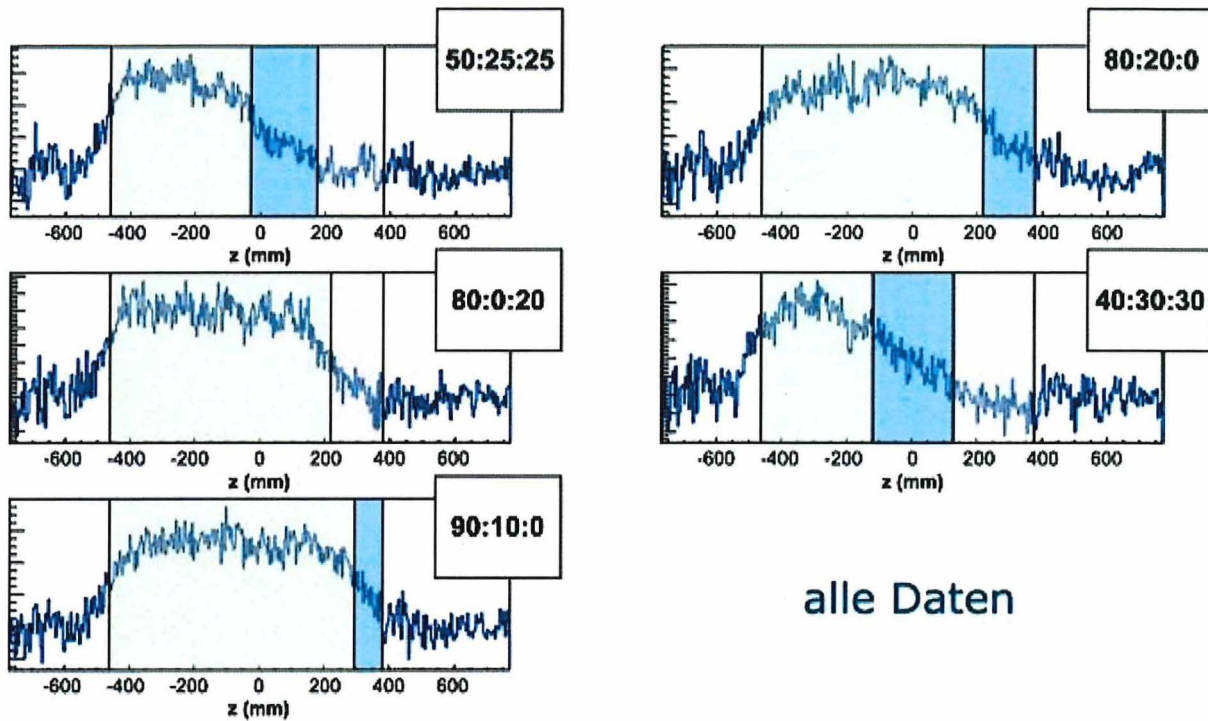



Abb. 27: Ergebnisse der Phasengrenzenanalyse für die fünf Szenarien ohne Winkelbeschränkung.



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Auf	
NAAN	NNNNNNNNNNNNNN	NNAANN	AANNNA	AANN	AAA	AA	NNNN	NN	
9A	23420000				MAK	RB	0001	00	


**BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG**

Blatt:49

Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachanlage Asse II mittels Myographie

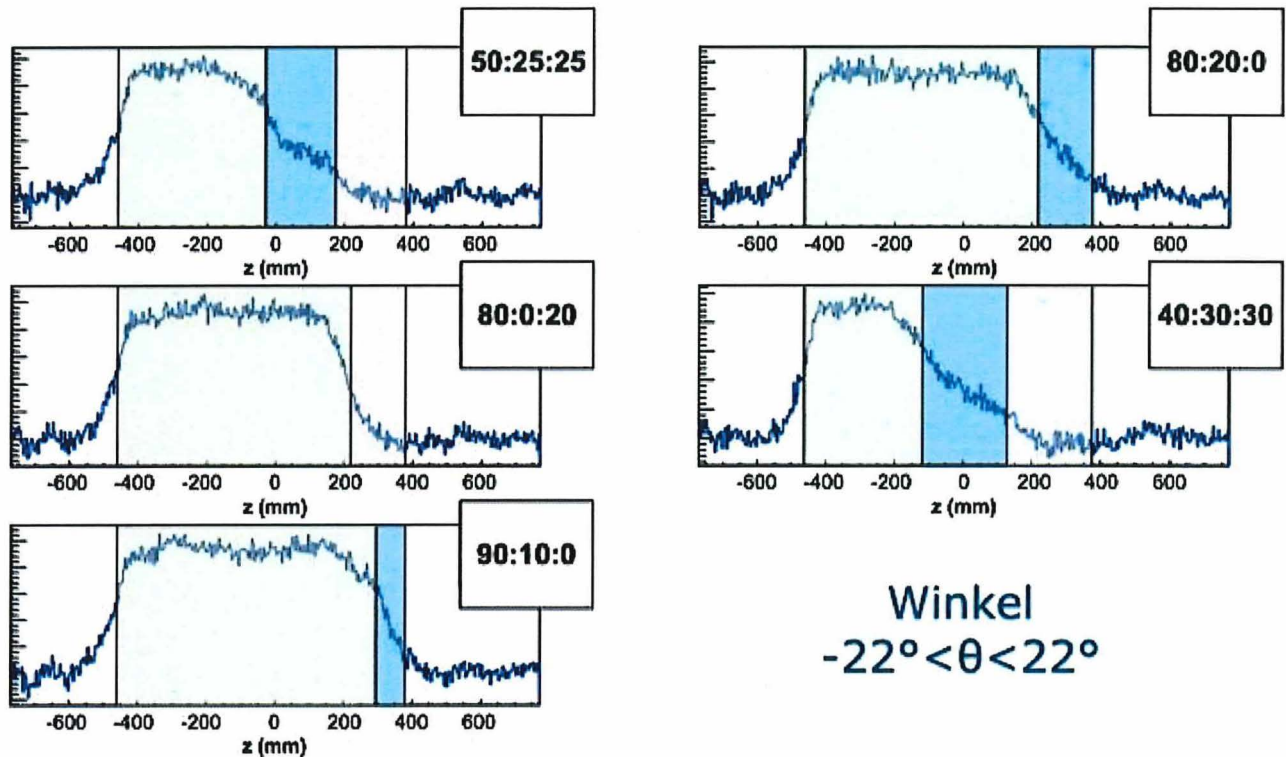


Abb. 28: Ergebnisse der Phasengrenzenanalyse für die fünf Szenarien mit einer Winkelbeschränkung zwischen  $0^\circ$  und  $22^\circ$  zur Horizontalen.

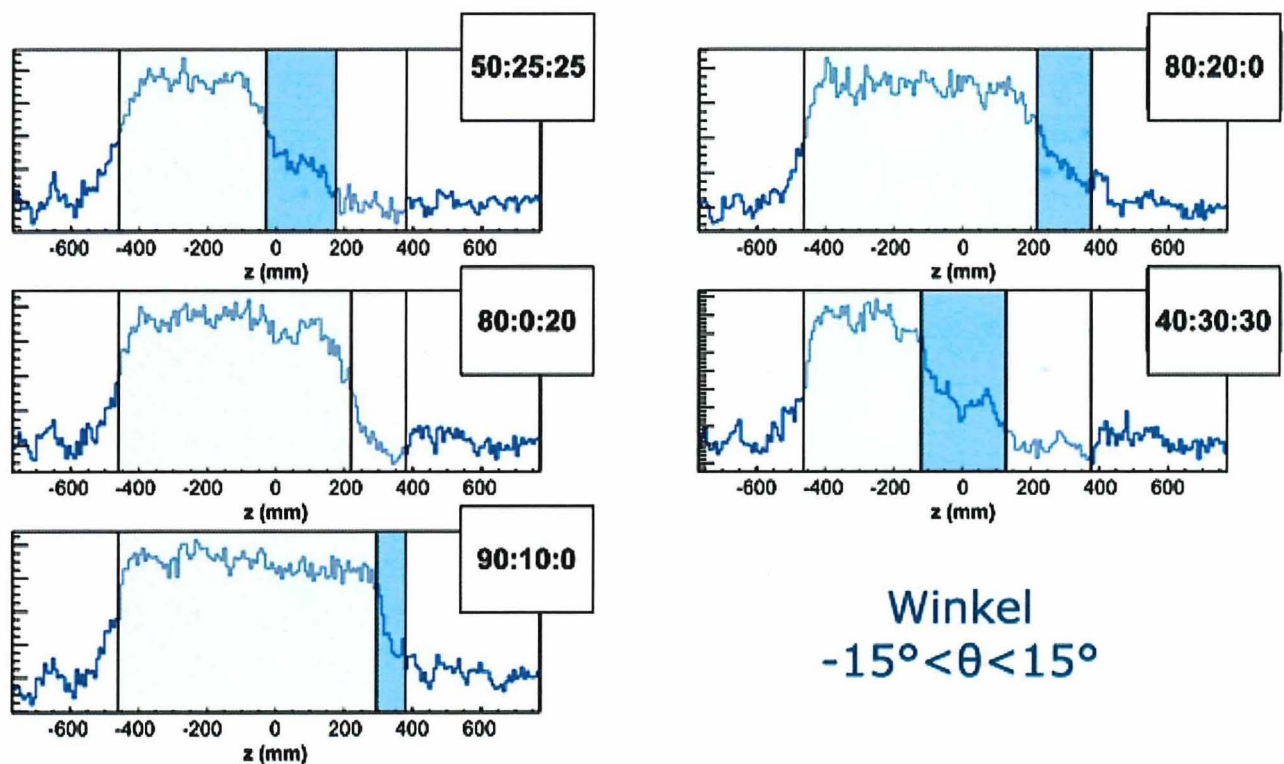


Abb. 29: Ergebnisse der Phasengrenzenanalyse für die fünf Szenarien mit einer Winkelbeschränkung zwischen  $0^\circ$  und  $15^\circ$  zur Horizontalen.

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Auf	BGE BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG
NAAN	NNNNNNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	23420000				MAK	RB	0001	00	Blatt:50

Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachtanlage Asse II mittels Myographie

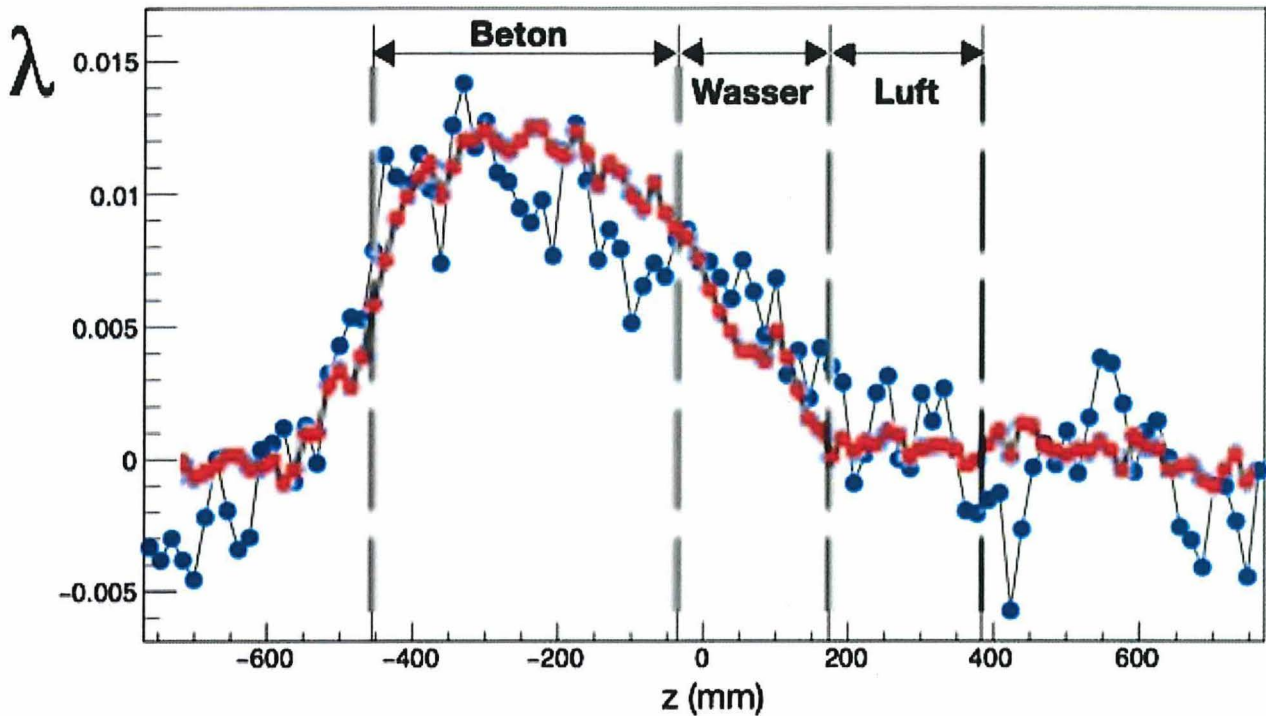


Abb. 30: Phasengrenzanalyse mit den Ergebnissen von 1 Woche (blau) der Myonendaten im Vergleich zu 8 Wochen (rot) für das Füllverhältnis von Betonwasser und -luft von 50:25:25.

Erste Daten wurden für 16 Wochen gesammelt, um die Art der Herausforderung zu verstehen. In Abb. 30 wurde die Analyse wiederholt, für Zeiträume von 1 Woche und 8 Wochen Datennahme und zum Vergleich mit dem 50% Beton, 25% Wasser und 25% Luft VBA-Szenario und mit 0° bis 22° Winkelbeschränkung. Während die statistische Präzision der einzelnen Streudichtemessungen zwischen den beiden Zeitplänen deutlich unterschiedlich ist, gibt es wenige Unterschiede zwischen der Gesamtform der Steigungen, auf die sich die Analyse stützt. Unter Berücksichtigung der statistischen Unsicherheiten wird die Genauigkeit der Phasengrenzmessung zwischen 1 Woche und den ursprünglichen 16 Wochen nur geringfügig beeinträchtigt. In 1 Woche beträgt die Unsicherheit ca. 2cm im Vergleich zu ca. 1cm Unsicherheit nach 16 Wochen.

Diese Technik hat sich bei der Bestimmung von Phasengrenzen innerhalb abgeschirmter Strukturen als mächtig erwiesen und scheint nicht so stark von Zeitskalen beeinflusst zu werden, wie es bei myographischen Analysen zu erwarten wäre.

Der Vollständigkeit halber sind die Ergebnisse dieses Szenarios für 1 Woche, 2 Wochen, 4 Wochen und 8 Wochen in Abb. 31 gezeigt. Diese zeigen mit der Zeit eine zunehmende Genauigkeit und bestätigen die oben getroffenen Aussagen.

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Auf	
NAAN	NNNNNNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	23420000				MAK	RB	0001	00	

Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachtanlage Asse II mittels Myographie

Blatt:51

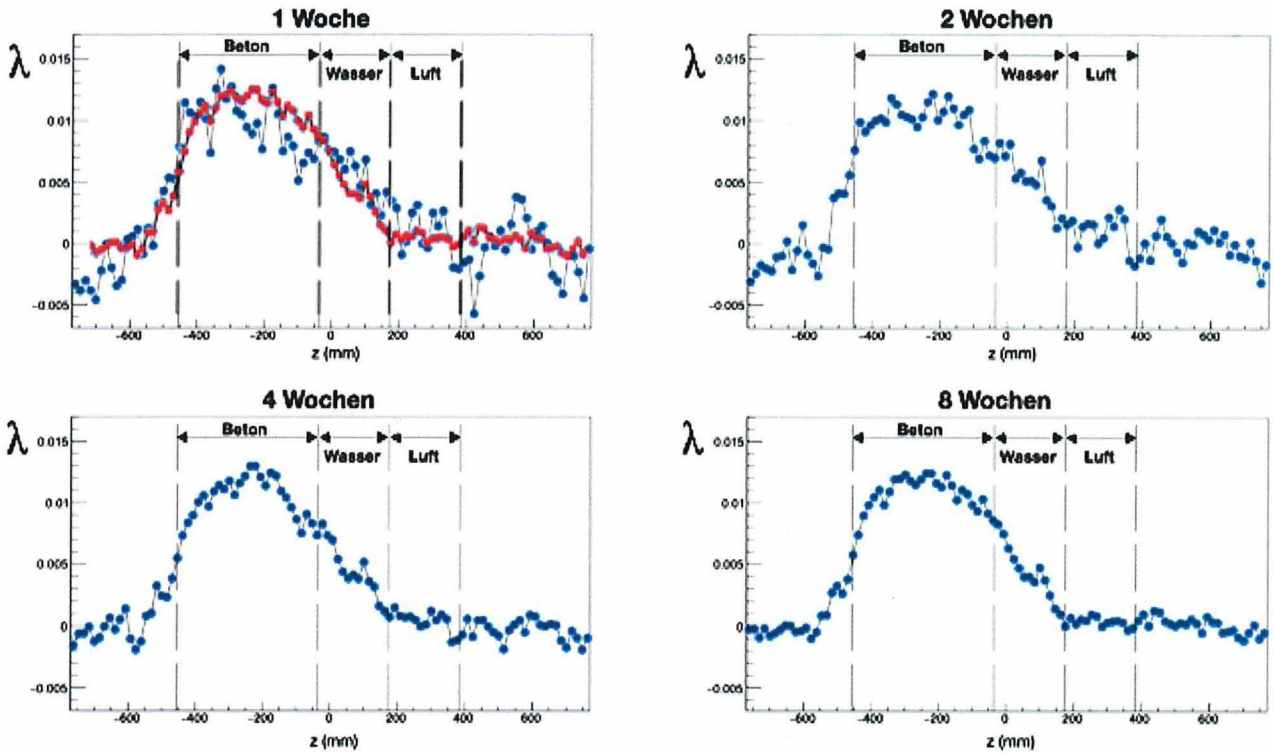


Abb. 31: Phasengrenzanalysen für das Füllverhältnis von Betonwasser und -luft im Verhältnis 50:25 für 1 Woche (oben links), 2 Wochen (oben rechts), 4 Wochen (unten links) und 8 Wochen (unten rechts) simulierter Myonendaten.

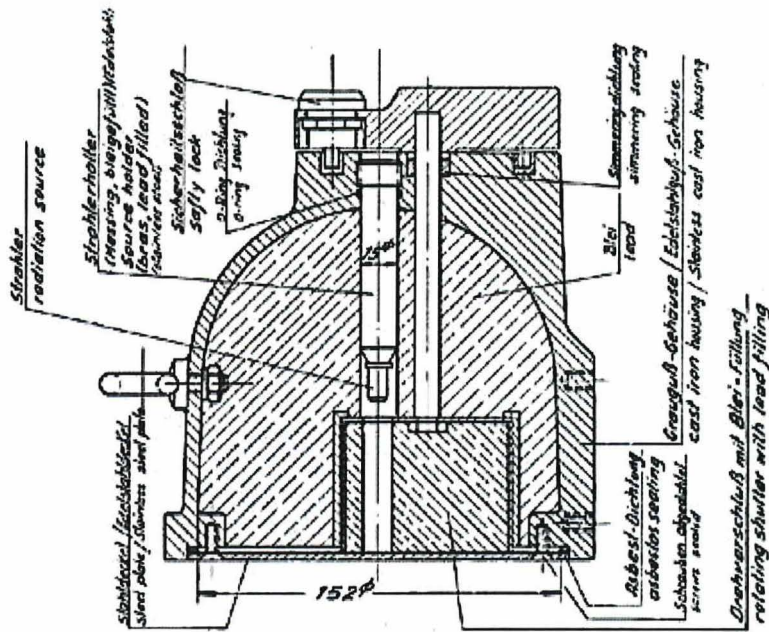
## 6.5 RADIOAKTIVE QUELLEN

Diese Studie konzentriert sich auf die Fähigkeit, Myonenanalysen an einer abgeschirmten radioaktiven Quelle durchzuführen. Die Beschreibung der Quelle stammt aus den Altakten der Schachtanlage Asse II und wurde von der BGE zur Verfügung gestellt. Ein Schema und eine Beschreibung hierzu finden sich in Abb. 32 und ein Bild der Geant4-Simulation in Abb. 33. Diese beruht auf einem Gehäuse aus Eisen auf einer Grundplatte aus Stahl. Im Inneren befindet sich ein Bleigehäuse, das eine Halterung für eine Quelle sowie eine radioaktive Quelle selbst umgibt. An der Basis befindet sich ein Schraubverschluss mit Bleifüllung. Diese Grundstruktur ist mit Asbest und an anderer Stelle mit O-Ring-Dichtungen und Sicherheitsschlössern abgedichtet.

Die erste durchgeführte Studie bestand darin, diese radioaktive Quelle in Luft abzubilden. Die Ergebnisse dieser Analyse zeigt Abb. 35 und Abb. 34. Das Vorhandensein radioaktiver Quellen kann bereits nach einem Tag in einem VBA mit Beton nachgewiesen werden. Dies basiert auf dem Nachweis der Erkennung der Abschirmstruktur aus Blei. Nach 4 Wochen ist die äußere Struktur deutlich zu sehen, aber es sind keine Informationen über die innere Struktur zu extrahieren. Selbst nach 8 Wochen, wie in den Ergebnissen für verschiedene Zeitintervalle in der Abbildung gezeigt, sind die internen Strukturen nicht erkennbar. Die Stärke der Bleiabschirmung stellt eine zu große Herausforderung für die Myographie dar, um etwas anderes als das Vorhandensein eines dieser Behälter für radioaktive Quellen zu identifizieren.

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Auf
NAAN	NNNNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	23420000				MAK	RB	0001	00

Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachanlage Asse II mittels Myographie



**2. Beschreibung der Abschirmung**

Der Strahler ist in einer Bleiabschirmung mit abgedichteten Gussgehäuse eingebaut. Das Rotationsgehäuse wird durch Drehflansche verschlossen. Der Strahlkopf wird in Stellung "zu" und "auf" verstellt und durch ein Schloß gesichert. Die Konstruktion der Abschirmung gewährleistet einen besonderen Festen und sicheren Einbau des Strahlers.

**Merkmale der Abschirmung:**

- 2.1 Ausführung: nach Zeichnung Nr. PD 2193-502
- 2.2 Außendurchmesser: ca. 180 mm
- 2.3 Länge: ca. 230 mm
- 2.4 Gesamtgewicht: ca. 31 kg
- 2.5 Abschirmdicke: ca. 67 mm Pb

Abb. 32: Schematische Darstellung der radioaktiven Quelle mit Beschreibung der Schlüsselkomponenten.

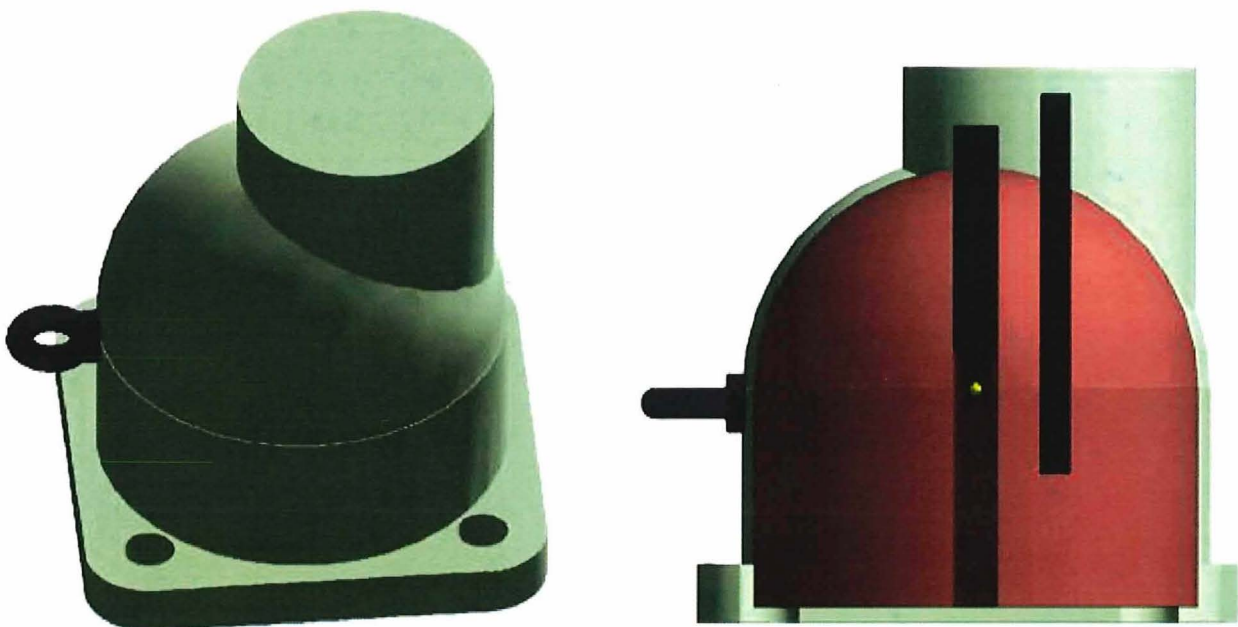



Abb. 33: Simulationen der radioaktiven Quelle mit dem äußeren Gussgehäuse (links) und der Ansicht des inneren Layouts (rechts). Die Quelle ist in der Mitte des Innenraums in einem Quellenhalter gelb dargestellt und von einer Bleidichtung (rot) umgeben.

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Auf	 <b>BUNDEGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG</b>
NAAN	NNNNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	23420000				MAK	RB	0001	00	

Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachtanlage Asse II mittels Myographie

Blatt:53

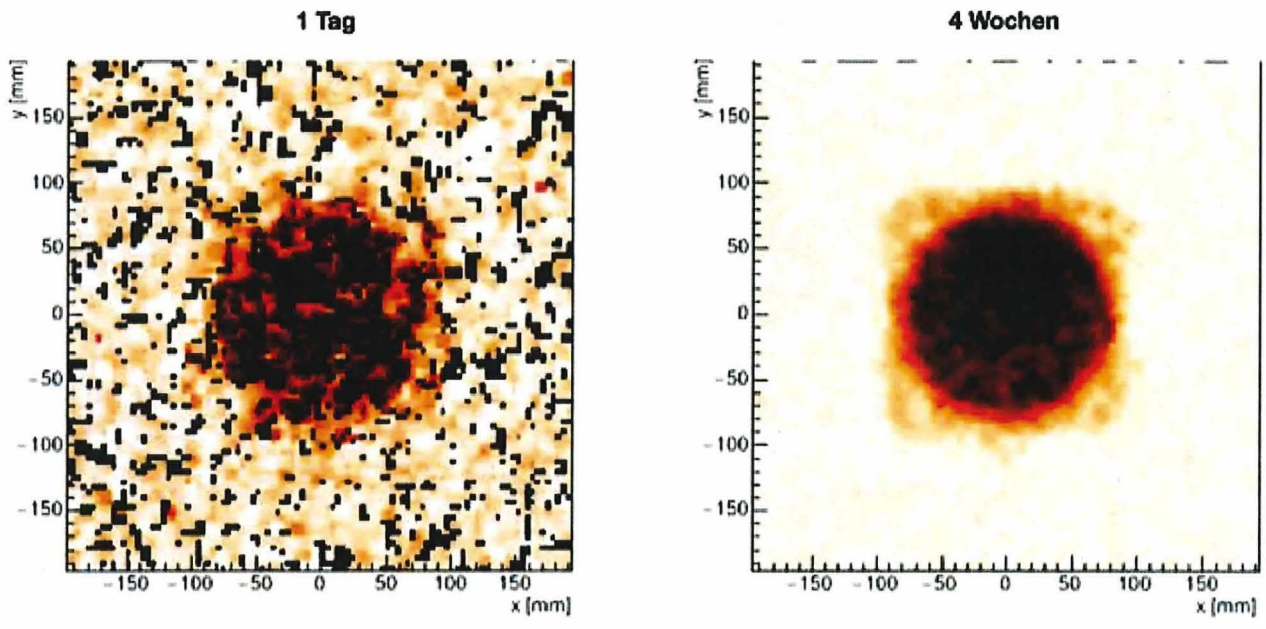


Abb. 34: Gezeigt sind die Ergebnisse der Bildgebung einer radioaktiven Quelle in der Luft für 1 Tag und 4 Wochen Myonenexposition. Das Quellgehäuse wird innerhalb eines Tages beobachtet. Auch nach 4 Wochen ist es nicht möglich, eines der internen Merkmale zu erkennen.

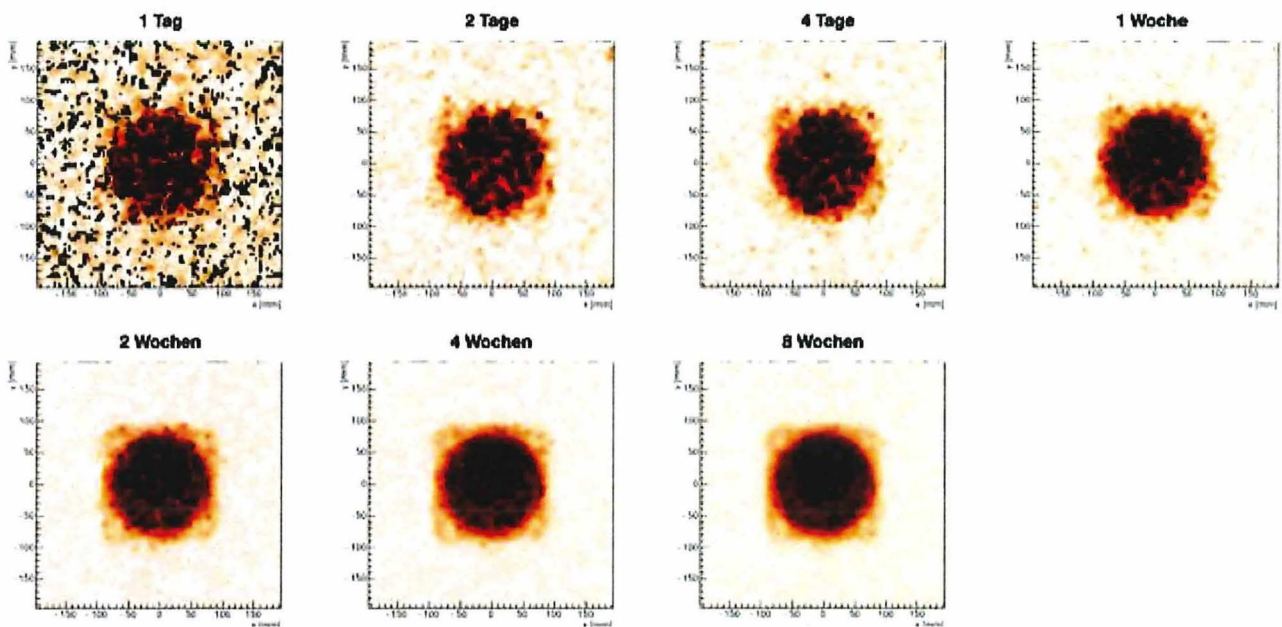


Abb. 35: Eine Erweiterung der für Abb. 34 durchgeführten Studien mit Ergebnissen für 2 Tage, 4 Tage, 1 Woche, 2 Wochen und 8 Wochen simulierte Myonenexposition.

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Auf		BGE BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG
NAAN	NNNNNNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	23420000				MAK	RB	0001	00		Blatt:54

Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachtanlage Asse II mittels Myographie

BGE  
BUNDESGESELLSCHAFT  
FÜR ENDLAGERUNG

Blatt:54

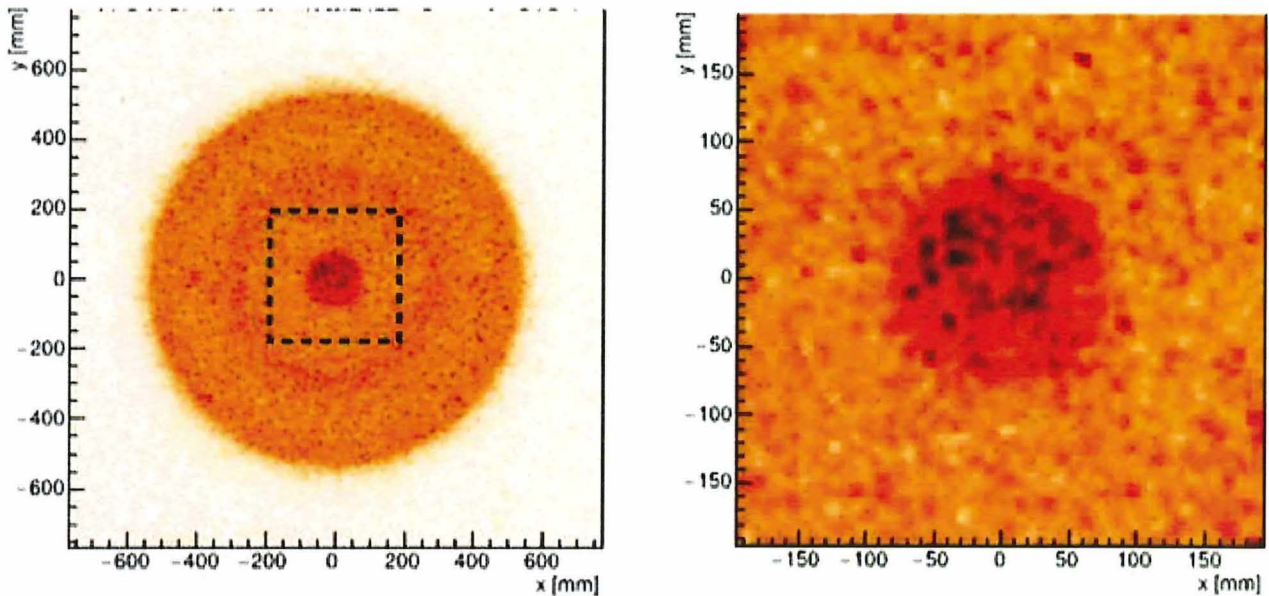


Abb. 36: Abgebildet sind 1cm horizontale Scheiben durch eine betongeschirmte VBA, die mit Beton gefüllt ist. In der Mitte der Basis befindet sich ein Behälter für radioaktive Quellen. Die vollständige VBA wird angezeigt (links) und ein vergrößerter Ausschnitt der Quelle (rechts) wird ebenfalls angezeigt. Die gestrichelte Linie stellt den Bereich des vergrößerten Ausschnittes dar.

Die nächste Studie bestand darin, festzustellen, ob es möglich ist, das Vorhandensein eines Behälters für radioaktive Quellen in einer VBA zu identifizieren. Für diese Studie wurde die Quelle an der Basis einer betongeschirmten und betongefüllten VBA platziert. Die Ergebnisse einer 4-wöchigen Myonenexposition sind in Abb. 36 gezeigt. Diese Ergebnisse zeigen, dass es möglich ist, das Vorhandensein einer dieser Strukturen innerhalb einer VBA zu identifizieren.

Zeitabhängige Ergebnisse sind in den Abbildungen 37 und 38 für Zeiträume von 1 Tag bis 8 Wochen dargestellt. Sie bestätigen, dass die zuvor gezeigten Ergebnisse für eine Quelle in Luft immer noch gültig sind, wenn die Quelle in einer VBA vorhanden ist. Es ist immer noch möglich, das Vorhandensein einer Quelle innerhalb von 1 Tag Datennahme und Bildgebungszeit zu identifizieren.

## 6.6 MATERIALIDENTIFIKATION

Die vorletzte Studie soll die Fähigkeit untersuchen, verschiedene Materialien innerhalb einer VBA zu identifizieren. Für diese Studie wurde eine betongeschirmte VBA mit Betonfüllung simuliert, bei dem 5 cm große Würfel aus Blei, Stahl, Kupfer, Glas und Aluminium in gleichem Abstand in der Mitte positioniert wurden. Die Daten wurden für einen Zeitraum zwischen 1 Tag und 8 Wochen simuliert. Das Ergebnis unter Verwendung von Daten aus 8 Wochen ist in Abb. 39 dargestellt, die die Positionen der simulierten Materialwürfel am besten zeigt.

Dieses Ergebnis zeigt das Potenzial, Blei, Stahl und Kupfer im Beton-VBA zu erkennen. Diese werden neben den internen Stahlkonstruktionen mit einer Auflösung von mehreren Millimetern in Bezug auf Größe und Lage nachgewiesen. Die Glas- und Aluminiumproben sind visuell nicht leicht zu identifizieren. Dazu ist eine erweiterte Analyse erforderlich.

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Auf		BGE BUNDEGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG
NAAN	NNNNNNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	23420000				MAK	RB	0001	00		Blatt:55

Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachtanlage Asse II mittels Myographie

Blatt:55

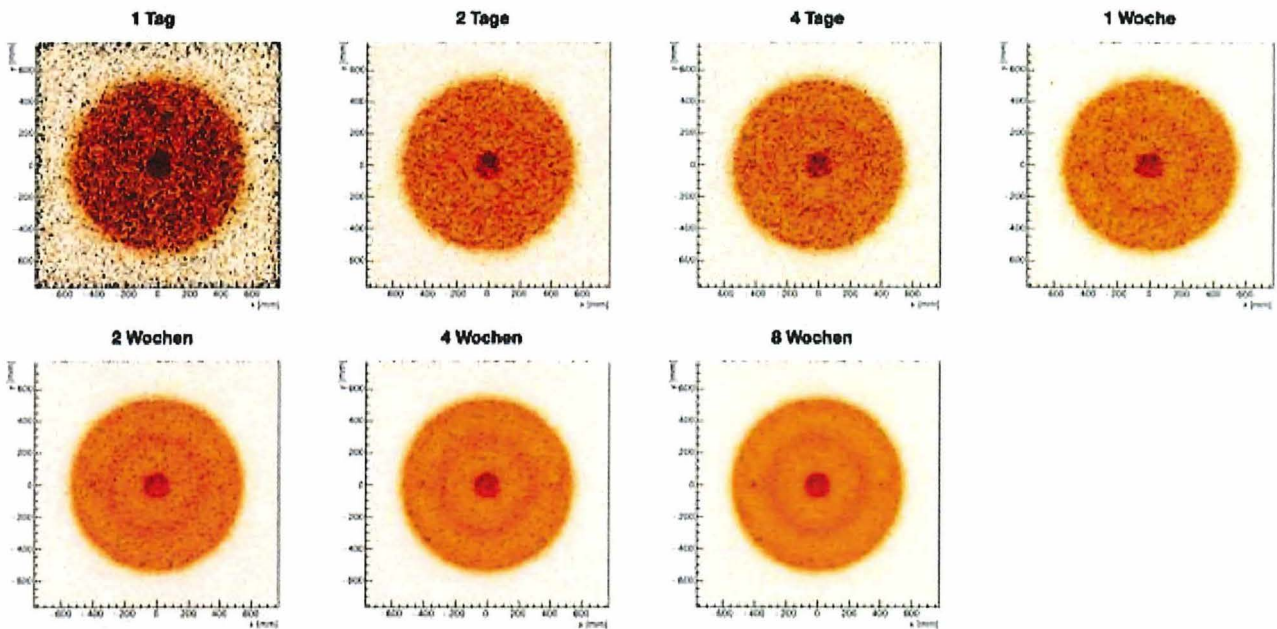


Abb. 37: Abgebildet sind 1cm horizontale Scheiben durch eine betongeschirmte VBA, die mit Beton gefüllt ist. In der Mitte der Basis befindet sich ein Behälter für radioaktive Quellen. Diese werden für verschiedene Zeiträume gezeigt, die von 1 Tag bis 8 Wochen reichen. Diese sind auf den Ergebnissen gekennzeichnet.

Zunächst sind die Ergebnisse aus verschiedenen Zeitskalen in Abb. 40 dargestellt. Dies zeigt das Vorhandensein des Blei-Körpers nach zwei Tagen zusammen mit Hinweisen auf das Vorhandensein der Stahl- und Kupfer-Körper.

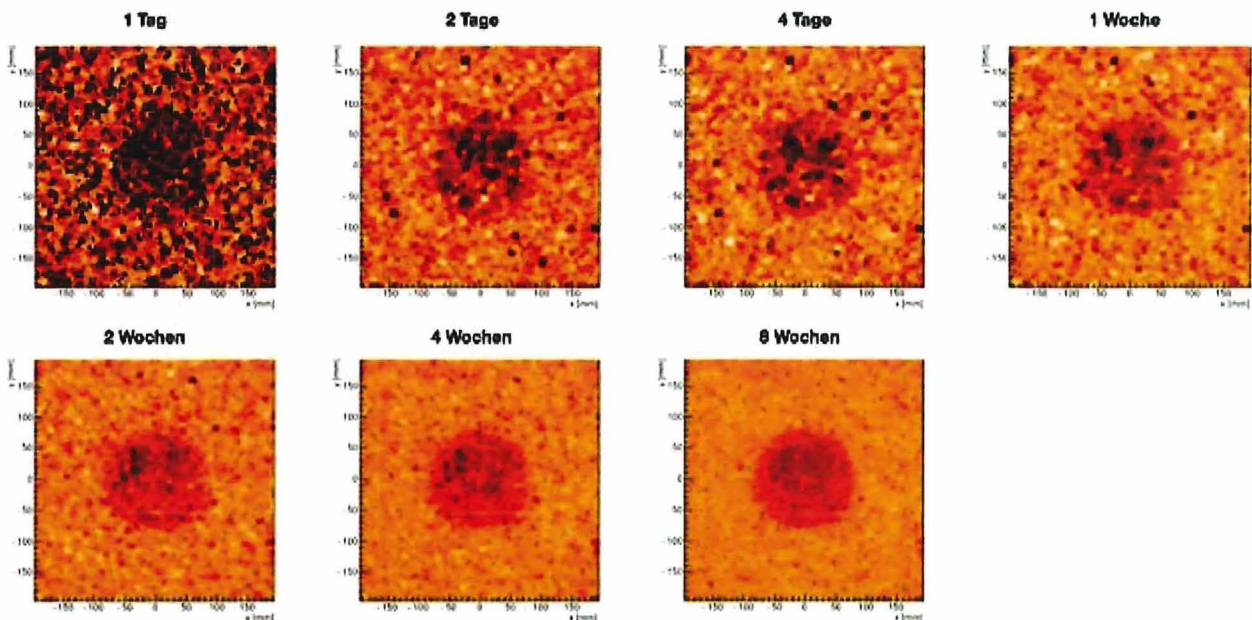


Abb. 38: Abgebildet sind 1cm horizontale Scheiben durch eine betongeschirmte VBA, die mit Beton gefüllt ist. Diese stellen vergrößerte Ansichten der entsprechenden Ergebnisse aus Abb. 37 dar.

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Auf		BGE BUNDEGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG
NAAN	NNNNNNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN		
9A	23420000				MAK	RB	0001	00		Blatt:56

Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachtanlage Asse II mittels Myographie

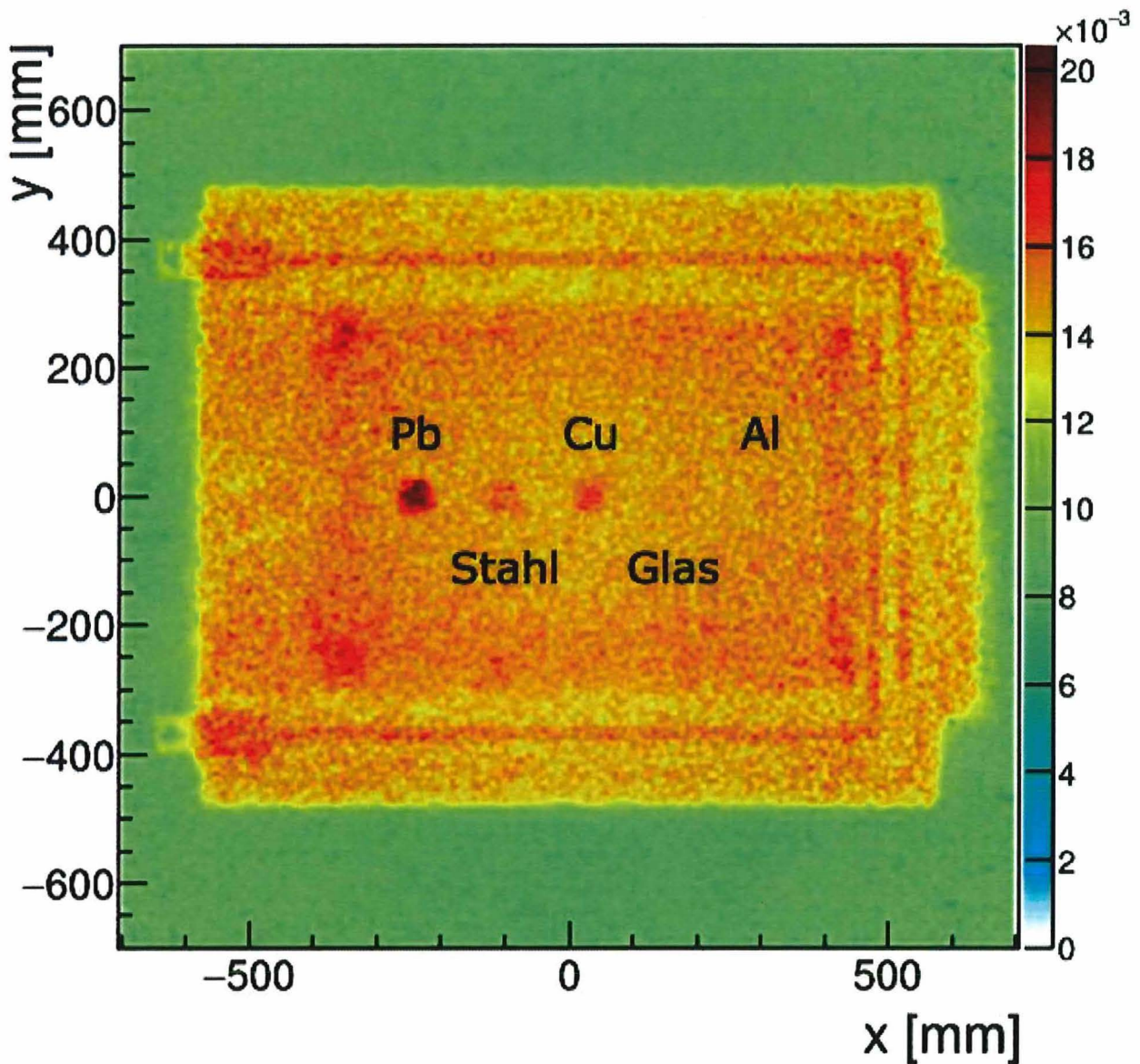


Abb. 39: Eine 1 cm dicke horizontale Scheibe durch eine betongeschirmte VBA mit Betonfüllung und fünf 5 cm großen Würfeln Blei (Pb), Stahl, Kupfer (Cu), Glas und Aluminium (Al).

Aus Abb. 40 ist erkennbar, dass es auch möglich ist, die VBA-Strukturen nach 1 Woche Daten zu erkennen. Die ersten 2 Wochen scheinen die Wichtigsten zu sein, da es in der zweiten zweiwöchigen Periode keine wesentliche Verbesserung zu geben scheint. Alle Ergebnisse zeigen, dass es schwierig ist, das Vorhandensein von Materialien mit geringerer Dichte innerhalb der Betonmatrix zu bestimmen. Dazu haben wir eine neue Analyseverfahren entwickelt, bei der wir die mittlere Streudichte des Betonhintergrunds subtrahieren, um die Signale der anderen Materialien zu verstärken. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 41 und 42 als Funktionen der inversen Strahlungslänge bzw. -dichte dargestellt.



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Auf	BGE BUNDEGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG
NAAN	NNNNNNNNNNNNNN	NNAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	23420000				MAK	RB	0001	00	Blatt:57

Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachtanlage Asse II mittels Myographie

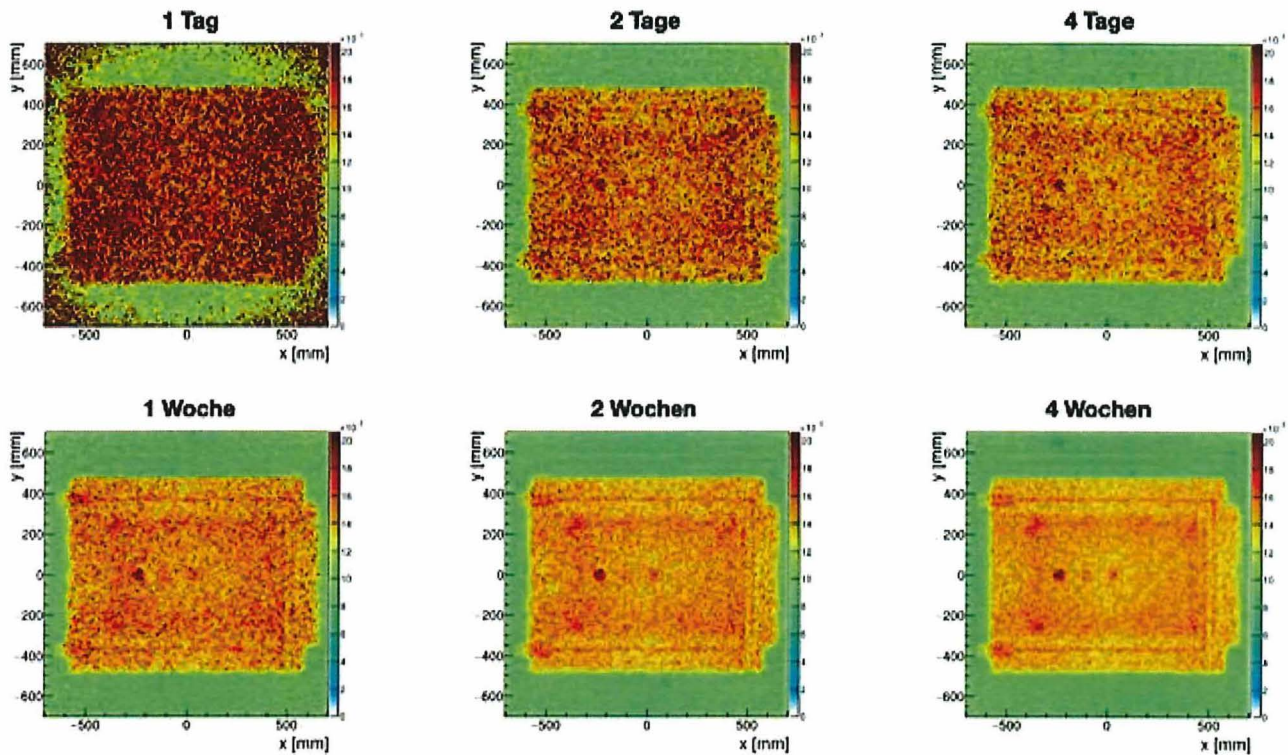


Abb. 40: Eine 1cm horizontale Scheibe durch eine betongeschirmte VBA mit Betonfüllung und fünf 5cm Würfeln aus Blei, Stahl, Kupfer, Glas und Aluminium für Zeiträume von 1 Tag bis 4 Wochen.

In den Bildern 41 und 42 zeigen die Ergebnisse dieser erweiterten Analyse den erwarteten linearen Zusammenhang zwischen den betonabgezogenen Streudichten und der inversen Strahlungslänge der Materialien. Mit einer fortgeschrittenen statistischen Fehleranalyse und 4 Wochen Daten ist es möglich, zwischen Blei, Kupfer und Stahl sowie Aluminium und Glas zu unterscheiden. Aufgrund der geringen Dichteunterschiede ist es jedoch nicht möglich, zwischen Stahl und Kupfer oder zwischen Aluminium und Glas zu unterscheiden. Folgende Dichten wurden verwendet:

- Beton (Dichte =  $2,40\text{g/cm}^3$ )
- Glas (Dichte =  $2,50\text{g/cm}^3$ )
- Aluminium (Dichte =  $2,70\text{g/cm}^3$ )
- Kupfer (Dichte =  $8,96\text{g/cm}^3$ )
- Stahl (Dichte =  $7,85\text{g/cm}^3$ )
- Blei (Dichte =  $11,29\text{g/cm}^3$ ).

Die dichteabhängigen Ergebnisse zeigen eine stark ansteigende Abhängigkeit. Dies unterstreicht die Herausforderung, die bei der Unterscheidung zwischen Materialien mit geringer Dichte besteht.

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Auf	BGE BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG
NAAN	NNNNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	23420000				MAK	RB	0001	00	Blatt:58

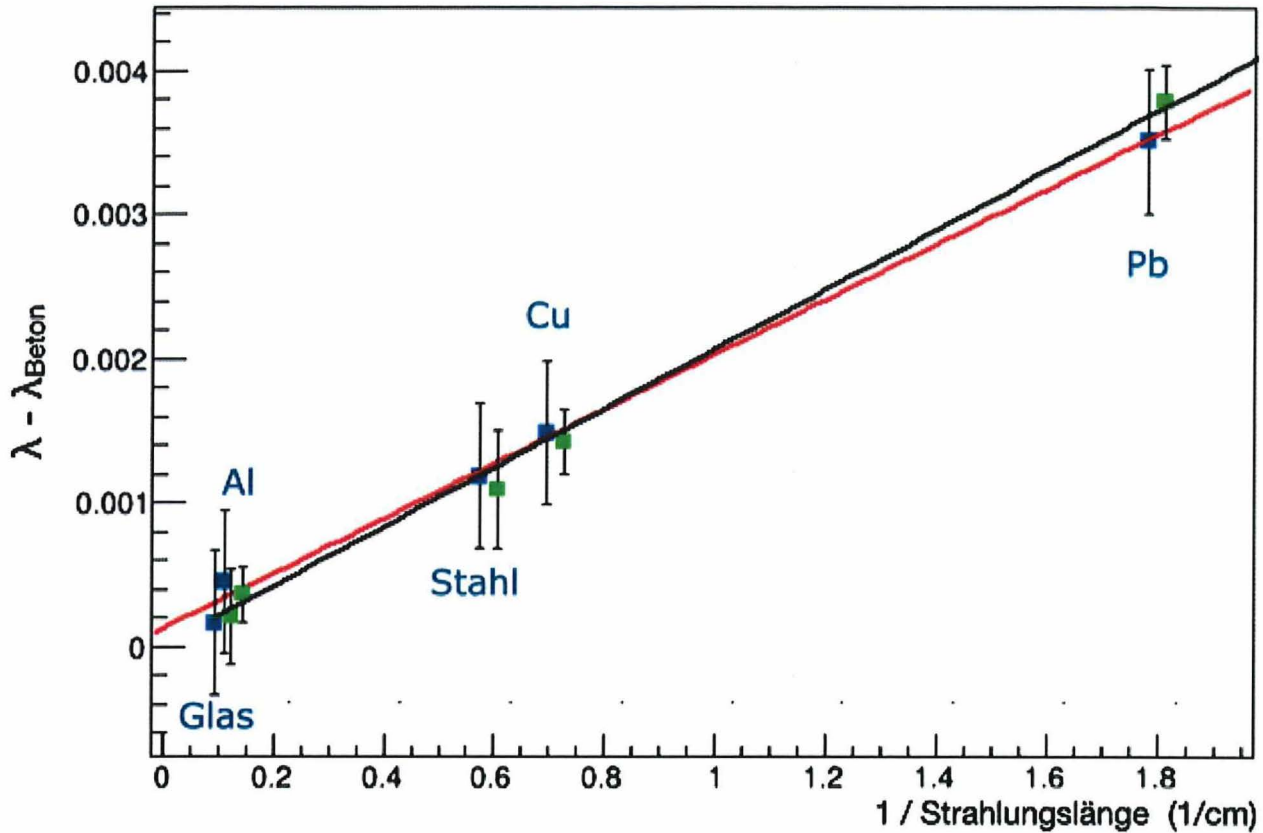


Abb. 41: Verhältnis der Streudichte jedes Materials zur Betonstreudichte subtrahiert gegenüber der inversen Strahlungslänge jedes Materials. Die untersuchten Materialien sind Glas, Aluminium (Al), Stahl, Kupfer (Cu) und Blei (Pb). Die blauen Datenpunkte und die rote Linie zeigen Ergebnisse aus einer anfänglichen Fehleranalyse und grüne Datenpunkte und schwarze Linie sind aus einer verbesserten Analyse.

In ähnlicher Weise unterstreicht es die Stärke der Technik zur Identifizierung von Materialien mit hoher Dichte und zur Unterscheidung von Materialien mit niedriger und mittlerer Dichte. Die Ergebnisse und die Fehleranalyse schlagen ein "Ampel"-ähnliches System aus Materialien mit niedriger, mittlerer und hoher Dichte vor, die voneinander unterschieden werden können. Weitere Studien wären erforderlich, um feststellen zu können, welche Elemente voneinander unterschieden werden könnten, und natürlich würde das Ergebnis auch von den Dicken des Materials, den Zeitskalen und den für den Hintergrund verwendeten Materialien abhängen.

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Auf	BGE BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG
NAAN	NNNNNNNNNNNN	NNAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	23420000				MAK	RB	0001	00	Blatt:59
Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachtanlage Asse II mittels Myographie									

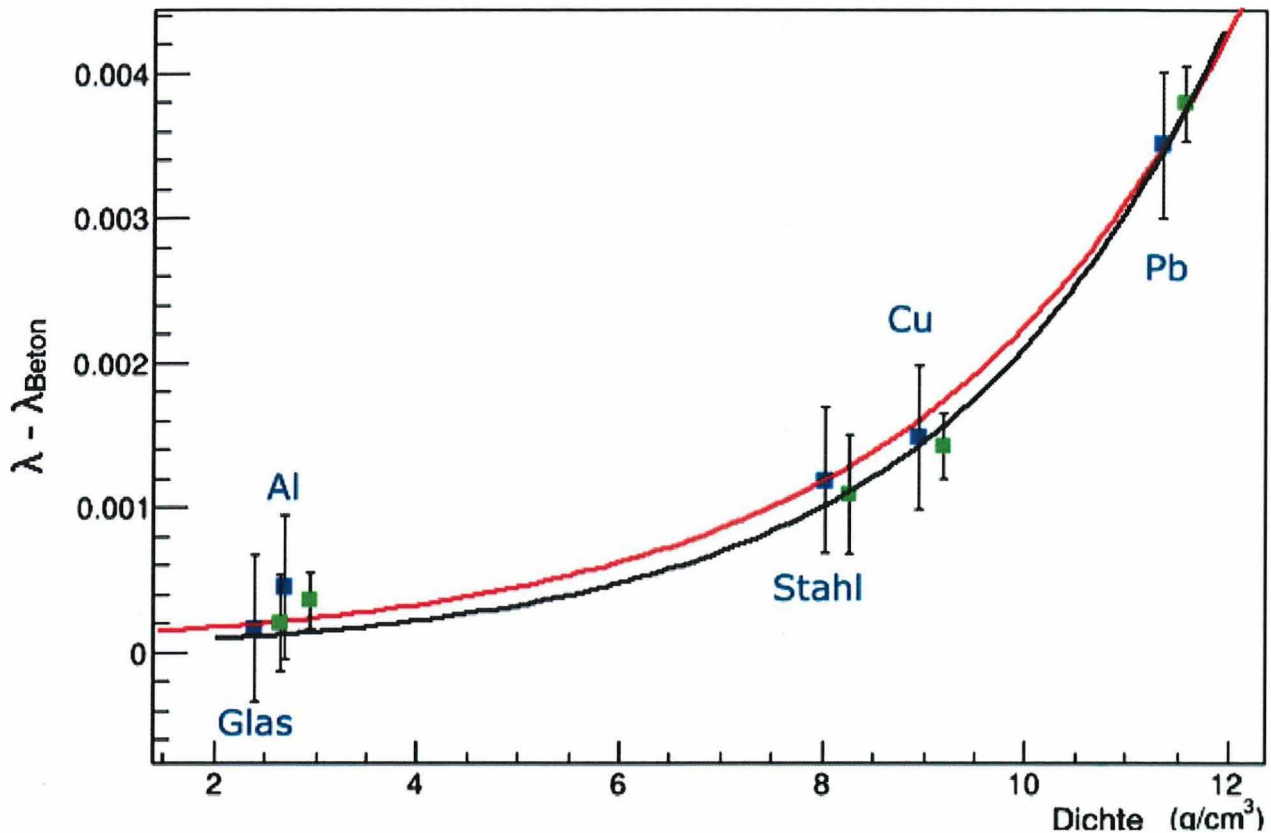


Abb. 42: Beziehung der Streudichte jedes Materials zur Betonstreudichte subtrahiert gegenüber der Dichte jedes Materials. Die untersuchten Materialien sind Glas, Aluminium (Al), Stahl, Kupfer (Cu) und Blei (Pb). Die blauen Datenpunkte und die rote Linie zeigen Ergebnisse aus einer anfänglichen Fehleranalyse und grüne Datenpunkte und schwarze Linie sind aus einer verbesserten Analyse.

## 6.7 KERNBRENNSTOFF

Die letzte Studie, die im Rahmen dieses Projekts durchgeführt wurde, bestand darin, den Gehalt an fein verteiltem Kernbrennstoff zu quantifizieren, der mit Hilfe der Myographie identifiziert werden kann. Da diese Studie die größte Herausforderung an die Technik darstellte, wurde ein betongeschirmtes VBA simuliert, das mit dem Material mit der geringsten Dichte, Bitumen, gefüllt war. Geringe Konzentrationen von Uran innerhalb dieser Matrix niedriger Dichte hätten einen größeren Einfluss auf die Gesamtdichte als in Beton. Uran wurde mit dem Bitumen in Mengen von 15 g bis 200 g pro 100 kg Bitumen gemischt. Dies führte zu einer mittleren Dichte des Füllmaterials, im Bereich von 1,043g/cm<sup>3</sup> bis 1,076g/cm<sup>3</sup>. Aus früheren Ergebnissen, einschließlich Abb. 42 sollte klar sein, dass dies eine große Herausforderung sein wird dieses zu erkennen. Die Ergebnisse der Analyse bestätigen diese Annahme. In Abb. 43 sind die verschiedenen Metriken als Funktion der Urananteile in der Bitumenfüllung gezeigt. Verschiedene Techniken wurden untersucht, einschließlich der Untersuchung verschiedener Myonenstreuungsmodelle in Geant4 und verschiedener Analysetechniken. Die beiden vielversprechendsten Analysen sind gezeigt. Beide Ergebnisse bestätigen, dass es nicht möglich ist, den Unterschied zwischen Anteilen des Urangehalts innerhalb des gewünschten Bereichs von 0,015% und 0,2% zu erkennen.

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Auf
NAAN	NNNNNNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	23420000				MAK	RB	0001	00

Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachtanlage Asse II mittels Myographie

Blatt:60

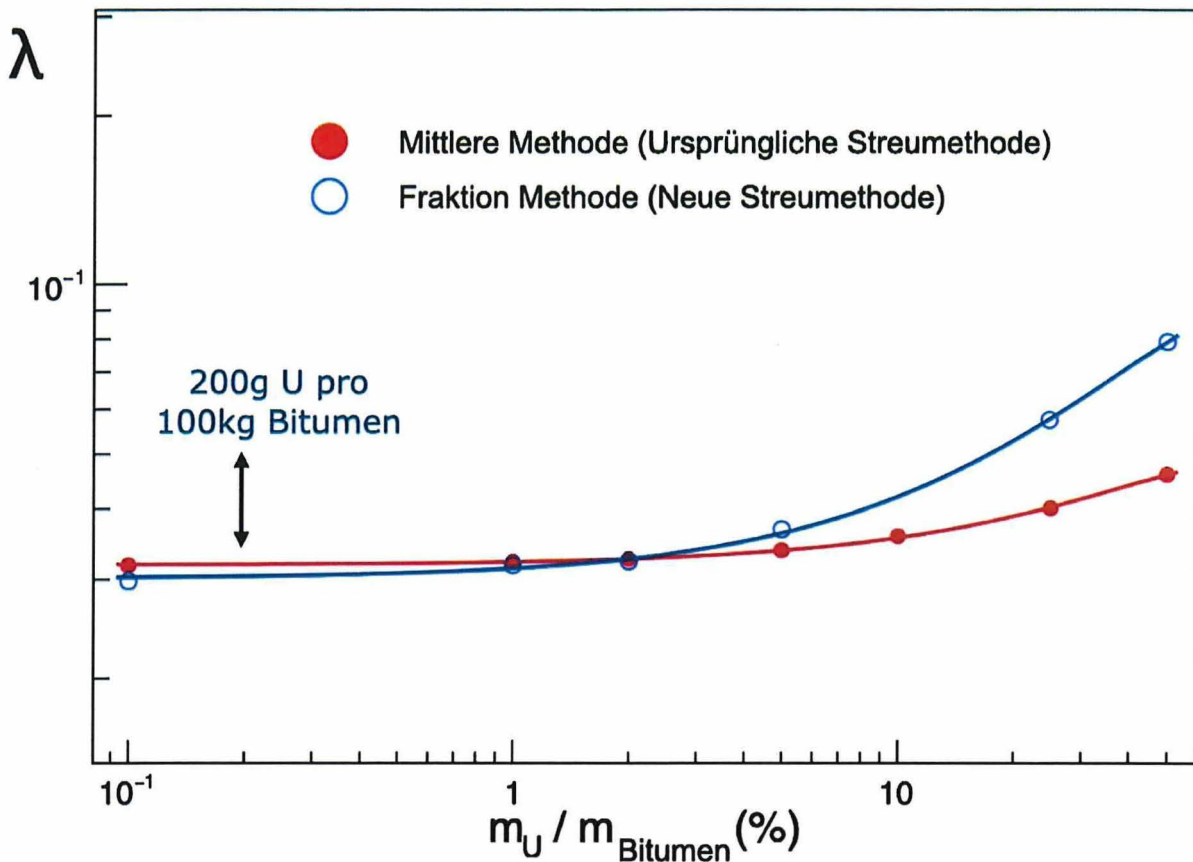


Abb. 43: Ergebnis der Untersuchung der Fähigkeit zur Identifizierung kleiner Mengen Uran, welches homogen in einer mit Bitumen gefüllten VBA verteilt ist. Verschiedene Analysen wurden durchgeführt und ihre Ergebnisse in Abhängigkeit vom Urangehalt dargestellt.

Mit einem aktualisierten Modell für die Myonenstreuung in Geant4 scheint es möglich zu sein, Urananteile von mehr als etwa 5-10% innerhalb des Bitumens zu erkennen. Diese Studie beruht auf 4 Wochen Myonendaten. Mehr Daten scheinen das Ergebnis nicht zu verbessern. Das neue Modell für die Streuung von Myonen in Geant4 berechnet die Streuung an einzelnen Atomen, wohingegen das Standard-Modell die Streuung auf der Grundlage der durchschnittlichen Strahlungslänge innerhalb des Materials berechnet.

Diese Ergebnisse gelten jedoch für Uran, das homogen in einem vollständig mit Bitumen gefüllten Behälter verteilt ist. Basierend auf früheren Ergebnissen gibt es noch einige vielversprechende Möglichkeiten, die nun diskutiert werden. Erstens hat Lynkeos bei zahlreichen Gelegenheiten gezeigt, dass es für Myographie möglich ist, diskrete Uranproben bis zu Größen von ungefähr  $1 \text{ cm}^3$  Volumen zu identifizieren, abhängig von der Behältergröße und den Zeitskalen. Bei einer Dichte von  $19 \text{ g/cm}^3$  ist es daher für die Myographie möglich, Uranmassen nahe am unteren Wert von 15 g Uran in 100 kg Bitumen zu identifizieren, wenn das Uran in einem Objekt konzentriert ist.

Ein weiteres Szenario, das diskutiert werden sollte, ist die Möglichkeit, dass sich feine Uranspäne aufgrund ihrer höheren Masse am Boden des Bitumenvolumens absetzen. Ergebnisse der Phasengrenzstudien (siehe Abschnitt 6.4) zeigen das Potenzial auf, unterschiedliche Füllstände von Material mit einer Genauigkeit von mehreren Zentimetern zu identifizieren. Wenn sich eine Bitumenschicht von mindestens 5 cm Tiefe mit einer erhöhten Urankonzentration zwischen 5-10% am Boden des Behälters befindet, dann sollte dies durch die Myographie zu erkennen sein. Dieser Grad an Gewissheit sollte in einem Zeitrahmen von 2 Wochen erreicht sein. Da das Problem eine

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Auf
NAAN	NNNNNNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
9A	23420000				MAK	RB	0001	00
Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachtanlage Asse II mittels Myographie								
Blatt:61								



komplexe Analyse mit vielen unabhängigen Parameter darstellt, war eine Fehleranalyse für diese Studie nicht möglich.

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Auf	BGE BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG
NAAN	NNNNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	23420000				MAK	RB	0001	00	Blatt:62
Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachtanlage Asse II mittels Myographie									

## 7 MULTIMODALES POTENZIAL

Die Myographie ist eine sehr leistungsfähige, passive Untersuchungstechnik mit enormem Potenzial. Sie bietet einzigartige Fähigkeiten in Szenarien, in denen konventionellere ZfP-Methoden versagen. Sie kann auch verwendet werden, um bestehende Methoden zu ergänzen und die Charakterisierung zu verbessern. Während sie in industriellen Anwendungen immer mehr Anwendungen findet, ist sie in einigen Fällen durch mehrere Faktoren begrenzt, einschließlich der Fähigkeit, Materialien zu identifizieren oder durch impraktikabel lange Messzeiträume. Wenn es jedoch um den Nachweis von Kernmaterialien geht, besteht das Potenzial, die Myographie durch Kombination mit anderen Partikeldetektionstechniken zu verbessern.

Dieser Abschnitt wird das multimodale Potenzial der Myographie untersuchen und sich auf zwei solcher zusätzliche Erkennungsfunktionen, nämlich Röntgenstrahlenemission beim Myonen-Einfang und Neutronen aus der Myonen-induzierten Spaltung von Atomkernen dargestellt in Abb. 44.

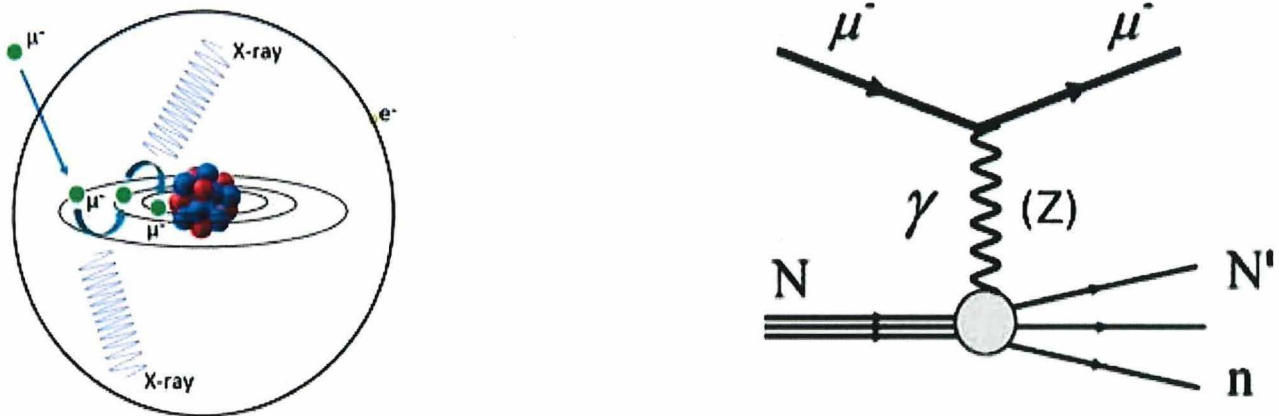



Abb. 44: Illustration der Myon-Capture-Röntgenemission (links) und das Feynman-Diagramm für die Myon-induzierte Spaltung (rechts) von einem Nukleon, bezeichnet mit N. Hier werden Myonen  $\mu^-$ , Elektronen als  $e^-$  bezeichnet, Photonen  $\gamma$ , Z-Bosonen sind Z und die Spaltprodukte bestehen aus  $N'$  und dem emittierten Neutron n.

### 7.1 MYONEN-CAPTURE-RÖNTGENSTRAHLEN

Es ist möglich, die Myon-induzierte Röntgenstrahlen zu verwenden, um eine Masse Uran in einem Behälter zu bestimmen. Dies liegt daran, dass negativ geladene Myonen genau wie ein Elektron wirken, jedoch mit einer etwa 207-mal größeren Masse. Wenn ein negatives Myon seine gesamte kinetische Energie verliert und in Materie stoppt, wird es im Coulomb-Feld eines Kerns eingefangen und es wird ein myonisches Atom gebildet. Das eingefangene Myon nimmt dann durch die Emission eines Elektrons und einer myonischen Röntgenemission einen niedrigeren Energiezustand im Atom an. Diese Röntgenstrahlen sind charakteristisch für den Kern, der das Myon eingefangen hat. Die Energien der myonischen Röntgenstrahlung sind aufgrund der größeren Masse eines negativen Myons höher als die der Röntgenstrahlung aus elektronischen Übergängen. Diese myonischen Röntgenstrahlen lassen sich mit einem Halbleiterdetektor, wie einem hochauflösenden Germanium-Detektor, leicht identifizieren. Die Analyse des myonischen Röntgenemissionsspektrums liefert qualitative Ergebnisse über die elementare Zusammensetzung der Probe. Eine quantitative Analyse

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Auf	 <b>BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG</b>
NAAAN	NNNNNNNNNNNNNN	NAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	23420000				MAK	RB	0001	00	
Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachtanlage Asse II mittels Myographie									Blatt:63

ist auch nach Korrekturen für die Absorption möglich. Diese Technik wurde bereits erfolgreich in der archäologischen und medizinischen Wissenschaft für eine Reihe von Anwendungen eingesetzt.

In jüngster Zeit gibt es auch Studien, die sich auf den nuklearen Bereich erstrecken. Shimbara [15] schlugen die Verwendung von Myon-induzierten Röntgenstrahlen zur Identifizierung von Kernmaterialien vor. Sie führten eine Machbarkeitsstudie durch, bei der eine kleine Menge Eisen in 16 Tagen nachgewiesen werden kann. Die Autoren sagten auch voraus, dass diese Methode auf Kernmaterialien wie Uran ausgedehnt werden kann. Aufgrund der sehr hohen Energie der Röntgenstrahlen (es wurde beispielsweise berichtet, dass die Energien der  $K_{\alpha}$ -Röntgenstrahlung eines myonischen Uranatoms bei etwa 6,5 MeV liegen) können myonische Röntgenstrahlen Materialien ohne große Absorption durchdringen. Daher ist es möglich, myonische Röntgenstrahlen zu verwenden, um die Masse von Kernmaterialien zu messen. Um dies zu erreichen, ist eine hohe geometrische Akzeptanz von Röntgendetektoren unerlässlich. Idealerweise wird ein hochauflösender Röntgendetektor benötigt. Der Röntgendetektor muss mit einem Myonensystem kombiniert werden, so dass die Koinzidenz des gestoppten Myons und des myonischen Röntgenquants gemessen werden kann. Dies dient der Untergrundunterdrückung. Rosenberg [16] untersuchten auch die Möglichkeit, myonische Röntgenstrahlen zum Nachweis spezieller Kernmaterialien (**S**pecial **N**uclear **M**aterials, SNM) in Schiffscontainern zu verwenden. Laut dieser Studie ist es möglich, SNM mit den myonischen Röntgenstrahlen zu erkennen. Jedoch liegt die benötigte Messzeit in der Größenordnung von einigen zehn Minuten und nicht in den wenigen Minuten, die erforderlich sind, um den Durchfluss von Schiffscontainern in Überwachungshäfen aufrechtzuerhalten. Bei ihrer Berechnung wird SNM mit einer Fläche von 100 cm<sup>2</sup> angenommen. Die Dicke des SNM, aus dem Röntgenstrahlen entweichen können, beträgt etwa 1 cm. Röntgenstrahlen, die tiefer im SNM erzeugt werden, werden innerhalb des SNM gestoppt. Daher beträgt die bei ihrer Berechnung berücksichtigte SNM-Masse etwa ein paar Kilogramm. Sie haben die Abschwächung durch das SNM selbst in Betracht gezogen. Nach ihrer Berechnung besteht eine Wahrscheinlichkeit von 33%, dass die Röntgenstrahlung entweichen kann, wenn das SNM kugelförmig ist. Im Falle einer VBA ist die Dämpfungsrate höher, da der Innenbehälter durch dicken Beton abgeschirmt wird. MeV-Röntgenstrahlen werden jedoch routinemäßig als Strahlungsquellen für industrielle Computertomographien verwendet, um große, dichte Objekte abzubilden. Daher ist die Wahrscheinlichkeit, genügend Röntgenstrahlen für das VBA-Szenario nachzuweisen, immer noch hoch. Eine genaue Zeitschätzung zur Bestimmung der SNM-Masse ist derzeit nicht möglich, da die Verteilung des Urans in der Innenbehälter und die durch den Beton verursachte Dämpfung unterschiedlich sind. Eine detailliertere Studie wäre erforderlich, um die Machbarkeit der Verwendung von myonischen Röntgenstrahlen für den Fall von Kernbrennstoff innerhalb einer VBA zu bestimmen. Es lässt sich jedoch schlussfolgern, dass die myonische Röntgendetektion eine vielversprechende Methode ist, um die Uranmasse in einem betonierten Innenbehälter zu messen.

## 7.2 MYONEN-INDUZIERTE SPALTUNG

Wie die myonische Röntgendetektion beruht die myoneninduzierte Spaltung auf der Detektion eines anderen Teilchens in Koinzidenz mit einem Myon, um den Nachweis von SNM zu verbessern. In diesem Fall wird ein Neutron detektiert.

Myonen der kosmischen Strahlung, die auf spaltbares Material treffen, können Neutronenemission induzieren. Wenn die hochrelativistischen Myonen diese hochdichten Materialien passieren, verlieren sie Energie, indem sie Bremsstrahlungsphotonen emittieren. Prompte Neutronen können ausgestoßen werden, wenn die schweren Kerne mit diesen Photonen wechselwirken. Wir haben gelernt, dass, wenn ein negatives Myon all seine Energie verliert und es innerhalb des SNM stoppt, dies mit der Emission eines hochenergetischen myonischen Röntgenstrahls verbunden ist. Sie

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Auf	
NAAN	NNNNNNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	23420000				MAK	RB	0001	00	
Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachtanlage Asse II mittels Myographie									BGE BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG
									Blatt:64

können aber auch von einem gebundenen Proton eingefangen werden und erzeugen ein Neutron und ein Neutrino.

In spaltbaren Materialien können Myonen-induzierte Spaltneutronen Kettenreaktionen auslösen, die zur Emission mehrerer Neutronen führen. Diese können jedoch normalerweise von der zeiterfassenden Detektor-Elektronik herausgefiltert werden. Es ist auch wichtig zu erwähnen, dass Protonen, die im Fluss der kosmischen Strahlung vorhanden sind, Spallationsneutronen erzeugen können, die Teil eines Messhintergrunds sein würden. Für jede der Quellen können die von Myonen erzeugten Neutronen in Koinzidenz mit einem zu analysierenden Myon nachgewiesen werden. Für den Nachweis von Neutronen können verschiedene Technologien eingesetzt werden, darunter Flüssigszintillatoren und He-3- oder He-4-Gassysteme. Jede Technologie hat bestimmte Vorteile, die abhängig vom Energiebereich der erzeugten Neutronen sind. In den letzten Jahren wurden auch Entwicklungen mit Plastik-Szintillatordetektoren für die schnelle und thermische Neutronendetektion vorgenommen, vor allem für Systeme mit kleinem Volumen.

Für die VBA-Anwendung besteht die größte Herausforderung in der Abschirmung und anderen Strukturen, die die Neutronen absorbieren und moderieren. Guardincerri [17] untersuchten den Nachweis von Myon-markierten Neutronen zur SNM-Identifizierung. In dieser Studie wurden zwei EJ301-Flüssigszintillatordetektoren mit einem Durchmesser von 12,5 cm und einer Tiefe von 5 cm in Koinzidenz mit einem großvolumigen Myonen-Tracker verwendet. Ein niedrig angereicherter Uran-Würfel mit 10cm Kantenlänge mit 19,7% Uran-235 Gehalt wurde in das multimodale System eingebracht. Diese Studie kam zu dem Schluss, dass eine Stunde neutronenmarkierter Ereignisse ausreichte, um das Vorhandensein dieses Würfels nachzuweisen, wobei Dutzende von Stunden erforderlich waren, um seine Form und Größe zu bestimmen.

Es ist zum jetzigen Zeitpunkt unklar, ob diese Methode für den VBA-Fall geeignet ist. Es ist jedoch eine weitere Quelle möglicher Verbesserungen, insbesondere für die in Abschnitt 6.7 dargestellten Ergebnisse. Weitere Simulationsstudien wären erforderlich, um die Machbarkeit und Leistungsfähigkeit zu bestimmen.



Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Auf	
NAAN	NNNNNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	23420000				MAK	RB	0001	00	
Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachtanlage Asse II mittels Myographie									BGE BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG
									Blatt:65

## 8 SCHLUSSFOLGERUNG

Während dieser Studie haben Lynkeos und BGE zusammengearbeitet, um die Machbarkeit und das Potenzial der Verwendung von Myographie zur Charakterisierung von Abfallpaketen zu untersuchen, die aus der Schachtanlage Asse II geborgen werden sollen. Mehrere wichtige Charakterisierungsparameter wurden anhand von sieben detaillierten Geant4-Simulationen verschiedener VBA-Abfallpakete untersucht. Jeder von ihnen wird im Folgenden kurz zusammengefasst.

Zunächst wurde in Abschnitt 6.1 die Ausrichtung der Abfallverpackung untersucht, um die VBA-Anwendung zu verstehen und unsere myographischen Techniken dafür zu optimieren. Auf diese Weise konnten wir das Potenzial zur Identifizierung aller Schlüsselstrukturen einschließlich der Abschirmung, der Stahlstützstruktur und der Füllmaterialien aufzeigen. Es lieferte auch ein wichtiges Verständnis dafür, welche Ausrichtung der VBA (entweder horizontal oder vertikal) für jede der verbleibenden Studien optimal wäre. Hier wurde der Nachweis von Uran, Stahl und Hohlräumen innerhalb der VBA mit einer Genauigkeit von mehreren Millimetern erfolgreich demonstriert.

Als nächstes wurde in Abschnitt 6.2 die Fähigkeit der Technik demonstriert, die Abschirmungs- und Füllmaterialien einer VBA passiv zu bestimmen. Jedes der vier ausgewählten Materialien (Schwerbeton, Beton, Zement und Bitumen) wurde simuliert und abgebildet, um eine Kalibrierung basierend auf dem Inversen der Materialstrahlungslänge zu erstellen. Dies würde es ermöglichen, zukünftig Fässer passiv zu inspizieren, um die Art ihres Inhalts zu identifizieren. Dieser Grad an Gewissheit sollte in einem Zeitrahmen von 1 Woche erreicht sein.

In Abschnitt 6.3 wurde die Technik verwendet, um die Mindestgröße von Hohlräumen zu quantifizieren, die in einer betongeschirmten VBA, welche entweder mit Beton oder Bitumen gefüllt sind, nachgewiesen werden können. Es wurden neue Analysetechniken entwickelt, die in der Lage waren, 30 cm Hohlräume innerhalb von 2 Tagen in Beton (4 Tage in Bitumen), 20 cm Hohlräume innerhalb von 4 Tagen (8 Tage), 10 cm Hohlräume innerhalb von 8 Tagen (18 Tage) und 5 cm Hohlräume innerhalb von 17 Tagen zu identifizieren. Die Erkennung von Hohlräumen, die kleiner als Würfel mit 5cm Kantenlänge sind, hat sich als Herausforderung erwiesen. Zurzeit werden Anstrengungen unternommen, um dies mit ausgefeilter Datenanalyse und neuen Techniken auf der Grundlage des maschinellen Lernens zu verbessern.

Die in Abschnitt 6.4 gezeigten Studien untersuchten die Fähigkeit, Phasengrenzen zwischen Beton, Wasser und Luft zu messen. Diese wurden unter Verwendung einer vertikalen VBA mit vertikalen Detektoren und nahezu horizontalen Myonen durchgeführt. Die besten Ergebnisse wurden mit Myonen in einem Bereich zwischen 0 und 15 Grad von der Horizontalen beobachtet. Das Ergebnis ist, dass Phasengrenzen mit einer Genauigkeit von 1-2 cm in Zeitskalen von nur 1 Woche erkannt werden können.

In Abschnitt 6.5 verlagerte sich der Schwerpunkt auf den Nachweis abgeschirmter radioaktiver Quellen in einer VBA. Während es nicht möglich war, die innere Struktur dieser kleinen, bleigeschirmten Behälter zu untersuchen, war der Nachweis des Vorhandenseins eines Behälters selbst in weniger als einem Tag selbst in einer betongeschirmten, betongefüllten VBA möglich.

Die vorletzte Studie, die in Abschnitt 6.6 wurde, konzentrierte sich auf die Fähigkeit der Myographie, verschiedene Materialien in einer Reihe von Dichten zu identifizieren. Die fünf Materialien von Interesse (Aluminium, Glas, Kupfer, Stahl und Blei) wurden alle als 5 cm große Würfel in einer betongeschirmten VBA mit Betonfüllung simuliert. Der Block aus Blei war einfach zu identifizieren. Kupfer und Stahl waren zwar im Beton zu erkennen, konnten jedoch nicht voneinander unterschieden werden. Die Materialien Aluminium und Glas hatten eine dem Beton zu ähnliche Dichte, um sie auch bei längerer Abbildungsdauer nachweisen zu können. Eine weitere

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Auf	
NAAN	NNNNNNNNNNNNNN	NNAANN	AANNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	23420000				MAK	RB	0001	00	
Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachtanlage Asse II mittels Myographie									BGE BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG
									Blatt:66

Kalibrationskurve wurde generiert, die für die Erkennung zukünftiger "blinder" Bildgebungsstudien von Nutzen ist. Dieser Grad an Gewissheit sollte in einem Zeitrahmen zwischen 1 und 2 Wochen erreicht sein.

In Abschnitt 6.7 wurden die Simulationsstudien mit der Untersuchung homogen verteilter Feinanteile von Uran innerhalb einer mit Bitumen gefüllten VBA abgeschlossen. Dies erweist sich als schwierig, da nur Konzentrationen von ca. 5-10% Uran innerhalb von Bitumen identifiziert werden können. Es wurde jedoch eine Diskussion möglicher Szenarien vorgestellt, die die Fähigkeiten bei der Identifizierung kleiner, zentimetergroßer diskreter Uranblöcke und Sedimentschichten von Uran an der Basis eines Behälters hervorhoben. Dieser Grad an Gewissheit sollte in einem Zeitrahmen von 2 Wochen erreicht sein.

Schließlich präsentierte Abschnitt 7 eine Diskussion und ausgewählte Fallstudien komplementärer Techniken, die vielversprechend sind, um die Fähigkeit der Myographie zum Nachweis und zur Quantifizierung von Kernmaterial zu verbessern. Zwei spezifische Techniken wurden eingeführt, nämlich Röntgenstrahlen, welche durch den Einfang von Myonen induziert werden, und die Myonen-induzierte Spaltung. Beide zeigen ein vielversprechendes Potenzial in ähnlichen Anwendungen, jedoch wären weitere Studien erforderlich, um die Durchführbarkeit der Verwendung zu bestimmen, um die Charakterisierung von VBAs zu unterstützen.

Die Autoren danken der BGE für die Unterstützung bei diesem Projekt.

Basierend auf den Ergebnissen dieser Studie glauben wir, dass die Myographie eine wichtige Rolle spielt bei der passiven Charakterisierung und Inspektion von Abfällen, die aus der Schachtanlage Asse II zurückgeholt werden, bevor diese zukünftig gelagert werden.

Projekt	PSP-Element	Funktion/Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Auf	
NAAN	NNNNNNNNNNNNNN	NNAANN	AANNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	23420000				MAK	RB	0001	00	
Untersuchung der Machbarkeit der Charakterisierung von Radioaktiven Abfällen aus der Schachtanlage Asse II mittels Myographie									Blatt:67

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] R. Kaiser, Phil. Trans. R. Soc. A, 377, 0049, 2019.
- [2] L. Schultz et al., IEEE Transactions on Image Processing, 16, 1985, 2007.
- [3] A. Clarkson et al., Nucl. Instrum. Meth. A, 745, 138, 2014.
- [4] A. Clarkson et al., Nucl. Instrum. Meth. A, 746, 64, 2014.
- [5] A. Clarkson et al., JINST 10, 03, 03020, 2015.
- [6] G. Yang et al., International Conference on Brain Inspired Cognitive Systems, 808, 2018.
- [7] D. Mahon et al., Phil. Trans. R. Soc. A, 377, 0048, 2018.
- [8] G. Yang et al., Phil. Trans. R. Soc. A, 377, 0062, 2018.
- [9] A. Simpson et al., Applied Radiation and Isotopes, 157, 109033, 2020.
- [10] E. Niederleithinger et al., Journal of Nondestructive Evaluation, 40 (3) 1-14, 2021.
- [11] B. Clifford et al., <https://phase1.attract-eu.com/wp-content/uploads/2019/05/3DSCINT.pdf>, 2020.
- [12] S. Agostinelli et al., Nucl. Instrum. Meth. A, 506, 250, 2003.
- [13] L. Bonechi et al., Intl. Cosmic Ray Conf. Proc. 283, 2005.
- [14] D. Mahon et al., Waste Management Symposium (unpublished), 2022.
- [15] Y. Shimbara et al., Nuclear Physics and Gamma-Ray Sources for Nuclear Security and Nonproliferation, 333, 2014.
- [16] L. Rosenberg et al., <https://www.osti.gov/servlets/purl/15015181>, 2005.
- [17] E. Guardincerri et al., <https://arxiv.org/pdf/1406.1200.pdf>, 2014.